



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**MIKROSTRUKTURNÍ STABILITA SVARŮ PROVEDENÝCH
ELEKTRONOVÝM SVAZKEM**

MICROSTRUCTURE STABILITY OF ELECTRON BEAM WELDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ján Rončák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Ján Rončák**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Mikrostrukturní stabilita svarů provedených elektronovým svazkem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svary prováděné elektronovým svazkem jsou často aplikovány v energetickém průmyslu, kde jsou provozovány za zvýšených teplot. Ověření změn ve fázovém složení a změn morfologie mikrostruktury při vystavení zvýšeným teplotám je důležitým parametrem vypovídajícím o použitelnosti konkrétního heterogenního spoje.

Cíle bakalářské práce:

Mikrostrukturní studie materiálu svaru a materiálu tepelně ovlivněných oblastí bezprostředně po svaření a po provedeném žíhání po svaření. Srovnání pozorovaných mikrostruktur z hlediska možné přítomnosti fází ohrožujících zejména pevnost spoje. Popis reakcí probíhajících ve svarovém kovu s využitím DSC analýzy.

Seznam doporučené literatury:

Fremunt, P. a Podrábský, T. Konstrukční oceli. Brno: Cerm, 1996. 267 s.

Pluhař, J., Puškár, A., Koutský, J., Macek, K. a Beneš, V. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Praha: SNTL, 1987. 298 s.

Šenberger, J. aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTUM, 2008. 310 s. ISBN 978-80-214-3632-9.

Ptáček, L. a kol. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 384 s. ISBN 80-7204-248-3.

Dilthey, U. Welding Technology 1: Welding and Cutting Technologies. Aachen: Verl. der Augustinus-Buchh, 2005, 217 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cieľom bakalárskej práce je zhodnotenie mikroštruktúry a funkčnosti zvarových spojov pomocou metód z oblasti materiálových vied. Ako prvé sú v teoretickej časti postupne opísané viaceré druhy zvarovania pre porovnanie jednotlivých metód. V druhej časti sú predstavené jednotlivé materiály, ktoré boli použité na vytvorenie zvarového spoja a nakoniec vysvetlenie použitých metód pozorovania a skúšania vzoriek. Zvary boli vytvorené na dvoch vzorkách bez prídavného materiálu pomocou zariadenia využívajúceho elektrónový zväzok. Ide o spojenie austenitickej hadfieldovej ocele v kombinácii s feriticko-perlitickou uhlíkovou oceľou a v druhom prípade s antikorošnou feritickou oceľou s vysokým podielom chrómu.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is an evaluation of microstructure and functionality of welded joints by using methods of material engineering. At first, there are various methods of welding described in the theoretical part. In the second part, the thesis introduces every material that is used to create a welded joint. The final part then offers an explanation of every method used to analyse the process of welding. The joints were created on two specimens without any filler material and at the machine that uses electron beam. The first joint is a combination of austenitic hadfield steel with ferrite-perlite carbon steel and in the second case combined with stainless ferritic steel with high amount of chromium.

Kľúčové slová

zvarový spoj, zvarovanie ocelí, elektrónový zväzok, mikroštruktúra, stabilita

Key words

welded joint, steel welding, electron beam, microstructure, stability

Bibliografická citácia

RONČÁK, J. *Mikrostrukturní stabilita svarů provedených elektronovým svazkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 46 s. Vedúci bakalárskej práce doc. Ing. Vít Jan, PhD.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému mikrostruktúra svarových spojů provedených elektronovým svazkom vypracoval samostatne s využitím odbornej literatúry, ktorá je správne a účelovo uvedená v zozname použitej literatúry na konci tejto práce.

V Brne dňa 26.5.2017

.....

Ján Rončák

Pod'akovanie

Chcel by som sa pod'akovať vedúcemu mojej bakalárskej práce doc. Ing. Vítovi Janovi, PhD. za cenné rady a vedenie behom či už teoretickej alebo experimentálnej časti. Ďalej by som rád pod'akoval Ing. Petre Gavendovej, PhD. za pomoc pri výrobe metalografických výbrusov a v neposlednom rade by som rád pod'akoval svojej rodine a priateľom za podporu počas celej doby štúdia.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Metódy zvarania.....	10
2.1. Konvenčné metódy zvarania.....	10
2.1.1. Zvaranie metódou MIG,MAG.....	10
2.1.2. Zvaranie metódou TIG(WIG).....	12
2.2. Zvaranie pomocou koncentrovaného zväzku energie.....	14
2.2.1. Zvaranie elektrónovým zväzkom.....	14
2.2.2. Zvaranie laserom.....	17
3. Experimentálne materiály použité v práci.....	19
3.1. Austenitické mangánové ocele (Hadfield).....	19
3.2. Feritické chrómové ocele.....	19
3.3. Ocele obvyklých akostí, ocele určené pre zvaranie.....	20
4. Technológie pozorovania.....	20
4.1. Metalografia.....	20
4.2. Svetelná mikroskopia.....	23
4.3. Elektrónová mikroskopia.....	24
4.4. Skúšky tvrdosti(mikrotrvdosti).....	25
5. Experimentálna časť.....	26
5.1. Zariadenie využívajúce elektrónový zväzok.....	26
5.2. Experimentálny materiál.....	27
5.3. Technológie a postup analýzy vzoriek.....	28
6. Výsledky.....	31
6.1. Vzorka č.1- Hadfieldova a uhlíková oceľ.....	31
6.2. Vzorka č.2- Antikorózna a hadfieldova oceľ.....	35
7. Diskusia.....	39
8. Záver.....	43
Zoznam použitej literatúry.....	44
Zoznam použitých skratiek.....	46

1. Úvod

Zváranie ako proces spájania dvoch materiálov pomocou jeho pretavenia je jeden z najekonomickejších spôsobov v dnešnej dobe. Prvé zmienky o jeho využití sa datujú už do obdobia staroveku. Spoje vytvorené pomocou kováčskeho zvárania v dobe bronzovej či kamennej sú vystavené vo viacerých múzeách po svete, pričom ako príklad môžeme uviesť Národné múzeum v Dubline, kde sa nachádzajú malé kruhové časti škatúl zo zlata. [1]

Do 19. storočia bolo kováčske zváranie jedinou známou metódou využiteľnou pre tieto účely. Až neskôr sa s prudkým rozvojom techniky a viacerých vedných disciplín rozvinuli tri ďalšie metódy zvárania. Bolo to zváranie pomocou elektrického oblúku, plameňové a odporové. V súčasnej dobe sa využíva na zváranie viac ako 26% kovových materiálov, čo radí zváranie na špičku strojárnských technológií využívajúcich kovové materiály. [2]

Pri zváraní sa môžeme stretnúť s viacerými komplikáciami, pričom jednou z nich môžu byť nevhodné vlastnosti materiálov, ktoré chceme spájať. Pri oceliach s rozličným chemickým zložením dochádza k vzniku zvarového spoja, ktorý nemá jednoznačne dané chemické zloženie ani vlastnosti, čo znamená riziko fázovej nestability a vývoj krehkých fáz v priebehu používania. Riziko nefunkčnosti alebo spôsobenia havárie je zvýšená hlavne pri prevádzke za vysokých teplôt. Čiastočne môžeme týmto problémom zamedziť pomocou predohrevu pred samotným procesom spojovania alebo využiť typy zvárania v ochrannej atmosfére, kedy dochádza k absencii niektorých plynov a tým k zvýšeniu stability zvarového kovu.

2. Metódy zvarovania

2.1. Konvenčné metódy zvarovania

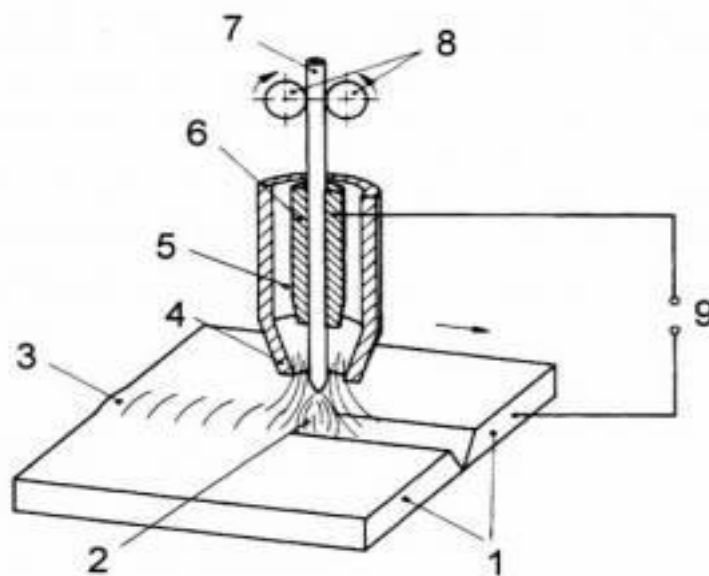
2.1.1. Zváranie metódou MIG, MAG

Princíp metódy

Metóda MIG/MAG je založená na princípe oblúkového procesu, kedy dochádza k zvarovaniu v plynnej ochrannej atmosfére. V prípade metódy MIG ide o inertné plyny a u metódy MAG využívame plyny aktívne. Základom je horenie elektrického oblúka, ktorý taví elektródu a základný materiál zároveň a dochádza tak k premiešaniu obidvoch materiálov pri prenose kovu z elektródy do zvarového kovu. Vďaka terciemu kontaktu v ústí horáku je zaručené napojenie drôtu na elektrický prúd. Zároveň je týmto systémom zaistená najkratšia dĺžka elektrického zaťaženia drôtu. Pre účely zvarovania sa využívajú buď plné drôty malého priemeru alebo plnené (rúrkové) drôty. Aby došlo k prenosu kovu do zvaru, je možné využiť nasledujúce metódy: skratovú, kvapkovú, sprchovú a impulznú. Každá z týchto metód má svoje jedinečné vlastnosti a odlišuje sa od ostatných viacerými faktormi, ktoré ju špecifikujú. Jednými z najdôležitejších faktorov sú priemer a zloženie elektródy, ale aj zloženie ochranného plynu. [1,2]

Medzi najväčšie výhody tejto metódy patrí:

- ľahký štart oblúka bez nárazu drôtu do zvaru
- vysoký výkon a prúdová hustota
- minimálna tvorba strusky, nízka pórovitosť a možnosť hlbokého závaru [2]



obr.2.1- schéma zvarovania pomocou metódy MIG/MAG [15]

Legenda: 1- základné materiály, 2-oblúk, 3-zvar, 4-dýza, 5-ochranný plyn, 6-kontaktná špička, 7- elektróda, 8- podávače elektródy, 9- zdroj prúdu

Ochranné plyny

Sú neoddeliteľnou súčasťou obidvoch metód spájania materiálov. Ich základným poslaním je ochrana zvarového kovu pred negatívnymi vplyvmi okolitej atmosféry. Pri tomto type zvarovania zabezpečujú dostatočnú hĺbku závaru, množstvo rozstreku a stabilitu elektrického oblúku. Pre

metódu MIG sa využívajú plyny na báze argónu a hélia, alebo ich dvojzložková zmes. Naopak pri metóde MAG je najčastejšie používaným plynom oxid uhličitý, ktorý však v niektorých prípadoch býva zmiešaný s argónom a kyslíkom. Oxid ako plyn má dobrý vplyv na horenie oblúku, ale jeho ionizačná schopnosť je slabá a pri určitých oceliach vzniká problém s natavovaním elektródy. V zmesi s argónom sa táto negatívna vlastnosť dostatočne obmedzuje. [2]

Dôležité parametre

Najdôležitejšie parametre, ktoré sa využívajú pri nastavovaní danej metódy sú prúdová hustota, efektivita elektródy, zváracie napätie a prúd. Hustota je daná elektrickým prúdom, ktorý prejde prierezom danej elektródy. Na jej veľkosť má vplyv rýchlosť podávania drôtu, pričom ak bude táto rýchlosť malá, zníži sa nám aj veľkosť prúdu. Nižšia prúdová hustota sa preto aplikuje na skratový prenos kovu a vyššia na ostatné 3 najznámejšie prenosy (kvapkový, sprchový a impulzný). Efektivita elektródy je množstvo elektródy v percentách, ktoré sa využilo na vytvorenie zvarového spoja. Do efektivity sa nezapočítavajú rozstreky, prechody ani dym. Najlepšie hodnoty efektivity dosahujeme pri spojení plynných zmesí argónu a oxidu uhličitého. Zváracie napätie ako také nemá veľký vplyv na samotný výkon roztavenia, ale o to viac ovplyvňuje šírku zvarovej húsenice a taktiež spôsob prenosu kovu. Prúd zase ovplyvňuje frekvenciu kvapiek, ktoré pri danom spôsobe prenosu dopadajú na zvarový kov a taktiež znižuje veľkosť ich objemu. [1,2]

Spôsoby prenosu kovu:

Skratový prenos

Tento typ prenosu sa niekedy nazýva aj mikrovlnné skratové zváranie. Základom je čelo elektródy, ktoré sa taví vplyvom opakovaných elektrických skratov, pričom samotný proces prenosu kvapiek nastáva počas skratovej fázy. Frekvencia sa pohybuje okolo 200 skratov za sekundu a jednou z typických vlastností tohto procesu je nízky tepelný príkon, čo nám vyhovuje pri zváraní tenkých plechov alebo prechodoch do hrubšieho materiálu. Prenos kovu a odtrhnutie od elektródy zabezpečuje elektromagnetické pole vytvorené elektrickým oblúkom. Metóda je pomerne jednoduchá a jej veľkou výhodou je aj 93%-né využitie elektródy, čo znižuje celkové náklady. Na druhej strane však často dochádza k prskaniu zvaru pri slabej kontrole procesu a preto treba aplikovať častejšie čistenie zvarových plôch. Využitie z hľadiska plynov je hlavne na báze 100% oxidu uhličitého alebo zmesi argónu a oxidu uhličitého. [1]

Rozsah zváracieho prúdu a napätia sa volí podľa kritéria výslednej frekvencie skratového prúdu. Experimentálnym skúšaním sa zistilo, že pre hodnoty vyššej frekvencie je potrebné nastaviť nižšiu hodnotu zváracieho napätia a naopak zvýšiť hodnotu zváracieho prúdu. Všeobecne sa hodnoty pohybujú v rozmedzí od 60 do 180 A čo sa týka prúdu a 14 až 22 V čo sa týka napätia. [2]

Kvapkový prenos

Podstatou celého procesu je kombinovanie predošlého skratového procesu a gravitačných síl Zeme. Vyššie hodnoty prúdu spôsobujú v tomto prípade silnejší rozstrek. Elektróda, ktorá má kladnú polaritu, vytvára nepravidelný tvar a vírivý pohyb kvapiek, pričom kvapky môžu mať väčší priemer ako samotná elektróda. Vďaka gravitácii následne prebieha prenos kovu do zvaru. Výhodou je vyššia rýchlosť procesu zvárania, ktorá však nestačí na sprchový prenos. Najčastejšie používaným plynom je v tomto prípade oxid uhličitý. [1]

V porovnaní so skratovým prenosom sú hodnoty či už napätia alebo prúdu pri zváraní omnoho vyššie. V prípade prúdu sú prijateľné hodnoty 190 až 300 A a napätie je možné voliť približne

22 až 28 V. Z rizika výrazného rozstreku sa neodporúča tento typ prenosu pre stredné hrúbky materiálov. [2]

Sprchový prenos

Typ bezskratového prenosu, ktorý sa nedá aplikovať pomocou ochrannej atmosféry využívajúcej oxid uhličitý. Dôvodom je vysoké povrchové napätie a tým pádom znemožnenie vytvorenia dostatočne drobných kvapiek. Náhradou za oxid uhličitý býva často čistý argón, poprípade jeho zmes s oxidom uhličitým alebo kyslík. Elektróda je pri vyšších koncentráciách argónu lepšie zahrievaná v dôsledku ionizácie plynu, čo dodáva potrebnú energiu aj na koniec drôtu. Pomocou magnetického poľa vytvoreného v oblúku sa kvapky oddeľujú do zvarového kovu s vysokou hodnotou frekvencie 150-350 Hz. Všetky tieto skutočnosti dopomáhajú k tomu, že je možné zvýšiť rýchlosť dopadu drôtu a skrátiť tak čas zvárania. Táto metóda je vhodná pre stredné a veľké hrúbky materiálu, pričom jej obrovskou výhodou oproti predošlým metódam je absencia rozstreku a väčšia hĺbka závaru. Je aplikovateľná na všetky komerčne známe zliatiny, počnúc hliníkom a končiac antikoroznými ocelami. [1,2]

Impulzný prenos

Ide o najdokonalejší bezskratový proces prechodu kovu do zvaru z doteraz uvedených. Neprievary a riziko rozstrekov pri skratovom a kvapkovom procese umožnili tejto metóde zdokonalenie a jej širšie využitie. Zvárací prúd cykluje medzi dvoma hodnotami: vysoký špičkový prúd a základný prúd. K prenosu kovu do zvarového spoja dochádza pri etape vysokého špičkového prúdu, ktorý sa môže nazývať aj impulzný. Funkciou základného prúdu je naopak udržanie samotného procesu v prevádzke. Čím narastá rýchlosť podávania prúdu, tým sa zvyšuje aj samotná frekvencia vysokého prúdu.

Frekvencia impulzov je taktiež priamoúmerná zváraciemu prúdu a nepriamoúmerná šírke impulzu. V praxi sa väčšinou frekvencia impulzov pomocou druhotných parametrov nastavuje na hodnoty od 25-500Hz. [1]

Najväčšími výhodami tohto prenosu sú:

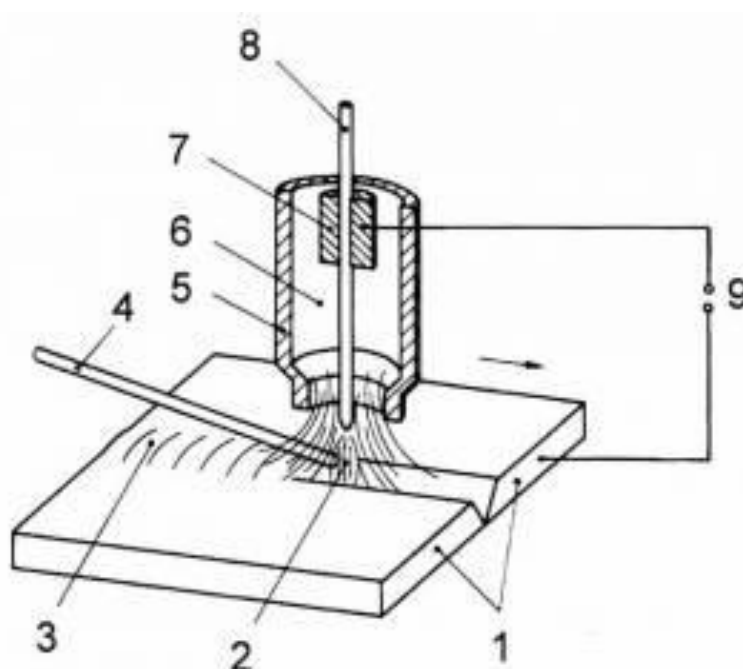
- možnosť zvárania tenkých plechov aj polohových zvaroch bezskratovým prenosom
- vhodný prenos pre hliník a jeho zliatiny, ale aj pre vysokolegované ocele
- menší deformačný účinok a tepelné ovplyvnenie z hľadiska porovnania pulzného a konštantného prúdu
- vyťaženie a využitie elektród na 98%
- nižší obsah vodíka ako v predošlých prípadoch [1,2]

2.1.2. Zváranie metódou TIG (WIG)

Princíp metódy

Zváranie pomocou elektrického oblúku v plynovej ochrane TIG je jedna z najpoužívanějších metód v súčasnosti. Ide o princíp netaviacej sa elektródy, kedy medzi jej hrotom a základným materiálom horí elektrický oblúk. Materiál, ktorý sa používa ako elektróda, musí zvládať veľmi vysoké teploty a preto sa ako najlepšie riešenie väčšinou volí volfrámová elektróda s prímiesou tória, céru alebo lantánu. Zváranie touto metódou je možné aj bez prídavného materiálu, kedy sa zvar vytvorí pretavením kovu a následným zatuhnutím kovu z hrán. Táto metóda je však menej používaná a väčšinou sa preferuje prítomnosť prídavného materiálu, ktorý sa pridáva do elektrického oblúka z boku. Zváranie touto metódou sa vyznačuje veľmi čistými a kvalitnými zvarmi, čo nám zaručuje zníženie nákladov na následné opracovanie po procese. Jej hlavnými prednosťami sú veľmi priaznivé formovanie húsenice, elektrický oblúk vysokej stability, jednoduchá obsluha a malá tepelne ovplyvnená oblasť, ktorá zaručuje minimálne deformácie

a zvýšenú plasticitu. Tak ako je v prípade metódy MIG/MAG dôležitým faktorom spôsob prenosu kovu, je v prípade metódy TIG zdroj prúdu. [1,2]



obr. 2.2-schéma zvarovania pomocou metódy TIG(WIG) [16]

Legenda: 1-základný materiál, 2-el. oblúk, 3-zvarový spoj, 4-prídavný materiál, 5-dýza, 6-ochranný plyn, 7-kontaktná špička, 8-elektroda, 9-zdroj prúdu

Ochranné plyny

Takisto ako v predošlej metóde, aj tu majú ochranné plyny úlohu chrániť zvar primárne pred oxidáciou a zároveň zachovať stabilitu oblúku. Pre ochranu zvarových spojov sa využívajú inertné plyny. Argón je najčastejšie využívaný plyn pri tejto metóde, či už z hľadiska svojich vlastností, ale zásadnú úlohu hrá aj jeho cena. Ďalšími plynmi, ktoré sa využívajú pre účely ochrany sú predovšetkým hélium, vodík, dusík a ich spoločné zmesi s argónom pre dosiahnutie optimálnych vlastností. [1,2]

Dôležité parametre

Najdôležitejším parametrom pri tejto metóde je typ zvaracieho prúdu a preto sa tomuto parametru treba venovať o niečo viac ako ostatným. Jednotlivé typy sú popísané v odstavcoch nižšie.

Napätie na oblúku je jediný faktor, ktorým dokážeme nastavovať a ovládať dĺžku oblúku. Čím vyššia bude hodnota napätia, tým širší bude zvar a naopak krátky oblúk zase spôsobuje riziko vzniku skratov. Napätím môžeme ovplyvniť aj množstvo kontaminantov v plyne či teplotné zmeny elektródy. Rýchlosť zvarovania môže výraznejšie ovplyvniť iba šírku zvaru a preto ju pri mechanizovanom type zvarovania fixujeme. [1]

Druhy zvaracích prúdov:

Jednosmerný prúd

Zvarová lázeň je pri tomto type použitia prúdu veľmi hlboká a to vďaka slabému tepelnému preťažovaniu elektródy, kedy až dve tretiny tepla z oblúku prechádzajú do základného materiálu. Zapojenie spočíva v pripojení elektródy k zápornému pólu a zvaraný materiál slúži

ako katóda. Zapojenie ako také patrí medzi základné a často používané z hľadiska metódy TIG. Dokázali by sme ho využiť aj pri našich typoch ocelí, ale aj pri rôznych zliatinách neželezných kovov. [2]

Striedavý prúd

Ak chceme využiť energiu zapojenia striedavým prúdom naplno, je potrebné zapojiť elektródu ako anódu, kedy vďaka vysokej energii získame vhodnú hĺbku závaru. Zapojenie elektródy ako katódy sa využíva kvôli jej schopnosti čistiaceho účinku, pričom sa oxidy odparujú po zasiahnutí katódovou škvrnou. Škvrna vzniká na základnom materiáli po zasiahnutí oblúkom. Na oxidy pôsobia mechanickým účinkom aj argónové ióny. Pri použití hélia ako ochranného plynu je však čistenie veľmi slabé a veľmi často ani nenastáva. [1,2]

Impulzný prúd

V súčasnosti najnovšia metóda pre zváranie metódou TIG. Ide o metódu, ktorá je veľmi podobná s metódou impulzného prenosu kovu pri metóde MIG a MAG z hľadiska správania prúdu. Aj v tomto prípade sa prúd delí na základný a impulzný, pričom základný má za úlohu zaisťovať ionizáciu oblúku a impulzný natavuje základný materiál a vytvára zvarovú lázeň. V súčasnosti existuje už aj metóda dvojimpulzného zvárania. Najväčšími výhodami tejto metódy sú:

- malá tepelne ovplyvnená oblasť
- zvýšená plasticita a menšia náchylnosť k praskaniu
- široká oblasť regulácie [2]

2.2. Zváranie pomocou koncentrovaného zväzku energie

2.2.1. Zváranie elektrónovým zväzkom

Princíp metódy

Zváranie elektrónovým lúčom používa k spájaniu materiálu teplo, ktoré získavame v dôsledku premeny kinetickej energie na energiu tepelnú. Táto energia sa vylučuje pri dopade elektrónov na základný materiál v mieste zvaru. Pri procese sa nevyužíva prídavný materiál a zvarový spoj vzniká premiešaním spájaných materiálov, pričom sa tak udeje bez pôsobenia tlaku. Okrem premeny energií dochádza aj k ďalším sekundárnym procesom, ktoré síce nie sú potrebné na dokončenie zvárania, ale dokážeme ich využiť vo svoj prospech. Pri interakcii elektrónov s materiálom totiž dochádza k emisii sekundárných elektrónov, vzniku rtg. žiarenia a spätne odrazených elektrónov. Proces nemôže prebiehať na vzduchu z dôvodu pohltienia energie elektrónov molekulami vzduchu a preto sa využíva systém vákuovej uzavretej komory. Na začiatku využívania tejto metódy boli požiadavky na vákuum omnoho náročnejšie či už v pracovnej komore, kde bola umiestnená súčiastka, ale aj v mieste tvorby a navádzania lúča. Postupom času a hlavne z dôvodu vysokej finančnej náročnosti obsluhy stroja boli znížené nároky na vákuum v pracovnej komore, pričom niektoré spoločnosti začali využívať iba čiastočný vákuový systém s pracovnou komorou na vzduchu. [1,3]

Postup vzniku a časti zariadenia

Celý proces začína v komore, kde sa nachádza elektrónové delo. Delo ako zdroj elektrónov a systémovú katódu využíva volfrámové alebo tantalové vlákno, pričom je naň zapojený prívod vysokého napätia. Pôsobením napätia, ktoré sa hodnotou môže pohybovať od 20 do 300 kV, sa vlákno zahrieva na vysoké teploty. Vlákno je ďalej obopnuté Wehnelovým valcom, ktorý vytvára vhodné podmienky pre vytvorenie elektrónov. Poslednou časťou tvorby lúča je anóda, ktorá má kladné vysoké napätie a vďaka tomu doslova vyťahuje elektróny z katódy. Pri

nahromadení energie pomocou vysokého napätia a Wehneltovho valca dodáva anóda prídavné zrýchlenie a tým elektróny urýchli na maximálnu požadovanú energiu. Pre výpočet výsledného tepelného príkonu sa využíva rovnica v tvare:

$$Q = \frac{E_x \cdot I}{v} = \frac{P}{v} \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (1)$$

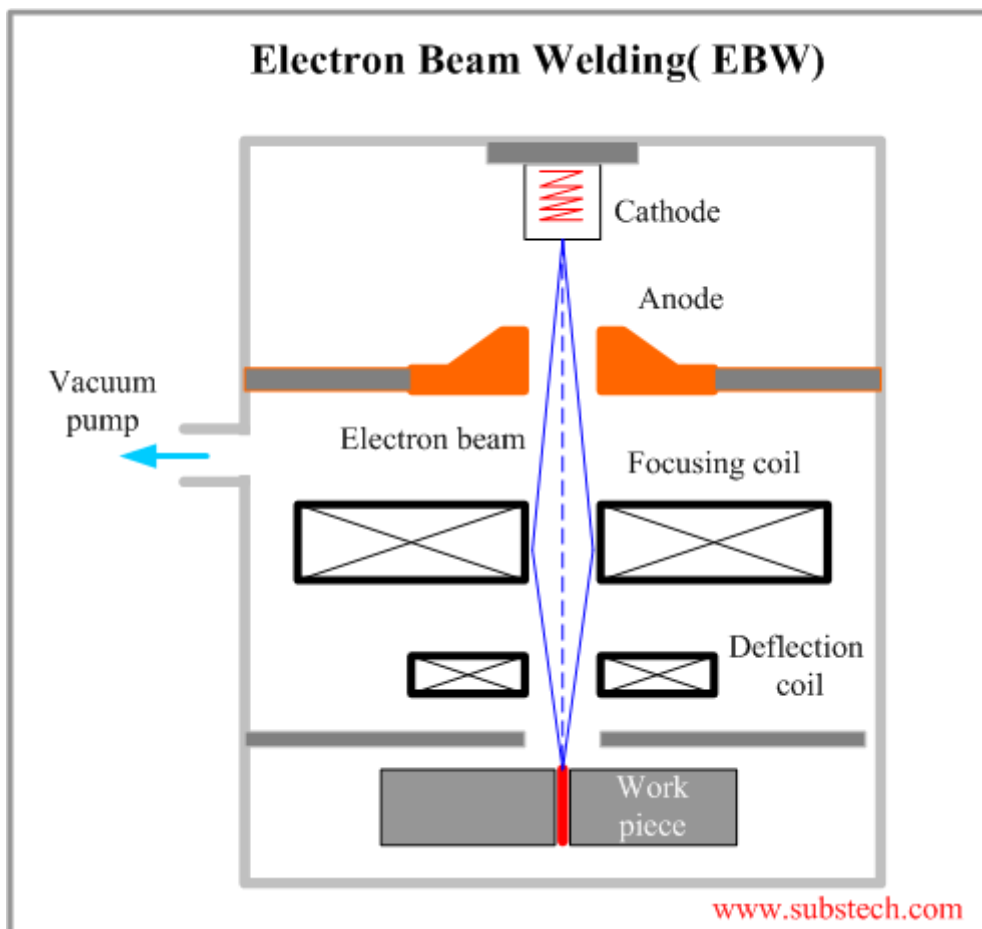
E- urýchľovacie napätie lúča [V]

I- prúd lúča [A]

v- rýchlosť zvarovania [mm/s]

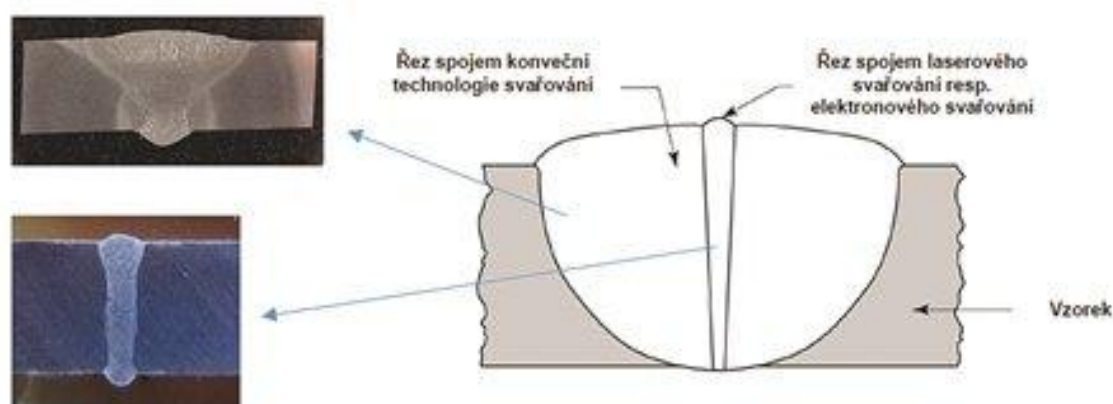
P=E.I- príkon lúča [W] [1,4]

Ďalšou časťou je miesto pod elektrónovým delom, kde sa nachádza elektrónová optika a riadiaci systém zariadenia. Na lúč v tomto priestore pôsobia elektrostatické a magnetické polia, ktoré ho pomocou elektromagnetických šošoviek dokážu transformovať podľa potreby. Vďaka tomu môžeme lúč rozširovať, urýchľovať a v prípade potreby aj vychyľovať kde nám to v danej chvíli najviac vyhovuje. Tieto procesy dokážeme vykonávať prakticky okamžite a preto je možné lúč pri ukončení zvarovania vychýliť tak, aby na konci nevznikol závar alebo iná vada. V tejto časti sa nachádza aj optika a okulár na pozorovanie procesu zvarovania. Na pozorovanie však môžeme využiť aj samotný lúč, kedy si obraz vytvoríme pomocou sekundárnych elektrónov. [1]



obr.2.3- zjednodušená schéma prístroja pre zvarovanie elektrónovým zväzkom [17]

Poslednou časťou, ktorá sa nachádza v systéme je pracovná komora. V komore dochádza k samotnému zváraniu materiálu pomocou lúča. Veľkosti komory sa líšia od typu a ceny prístroja. V praxi sa môže vyskytovať komora od 1 do 20 m³, ale existujú aj omnoho väčšie. Každá komora má svoje výhody aj nevýhody. Veľkosť nám ovplyvňuje čas, ktorý potrebujeme na jej odčerpanie, ale na druhej strane obmedzuje veľkosť súčiastky. V komore sa nachádza pracovný stolík, ktorý má väčšinou možnosť dvoj alebo trojosého posuvu. Pre prácu nám však úplne postačuje dvojosý systém, keďže tretiu súradnicu dokážeme regulovať pomocou nastavenia zväzku. Tak ako už bolo spomenuté, celý systém prístroja funguje na princípe vákuovej komory. Nároky na hodnotu vákua sa v každej časti prístroja líšia. Vákuum sa vytvára pomocou vývevy, ktorá sa volí podľa potreby a kvality daného prístroja. Rotačné vývevy sú základné, ktoré sa používajú najčastejšie a využívajú sa na odsávanie pracovnej komory. Difúzne a molekulárne vývevy pracujú pri vysokých otáčkach a vytvárajú lepšie prostredie vákua. V prípade drahších prístrojov je možné vytvoriť takzvaný airlock systém, kedy dochádza k samostatnému odsávaniu pracovnej komory a časti s elektrónovým delom. [1,3]



obr. 2.4-porovnanie konvenčnej technológie a koncentrovaného toku energie [18]

Pri samotnom procese môžeme využiť dva typy módov: vedenie tepla alebo mód kľúčovej diery, tzv. keyhole. Druhá spomínaná metóda je častejšie používanou a využíva sa hlavne pri zváraní hrubších prierezov. Lúč sústreďujeme pomocou šošoviek do materiálu, pričom elektróny prenikajú do hĺbky len niekoľkých mikrometrov a tam strácajú energiu. Rýchly ohrev a následné vyparovanie materiálu spôsobené amplitúdou vibrácie mriežky vedie k vytvoreniu úzkej ale hlbkej diery, ktorú nazývame kapilára. Zvyškový roztavený kov je tlačný vyparenými časticami základného materiálu do stien diery a časť pár uniká do vákua, čím zjednodušuje vnikanie elektrónov do hĺbky materiálu. Následným znížením tlaku v kapiláre dochádza k premiešaniu roztaveného kovu zo stien a zatuhnutiu zvarového spoja. [1,3]

Čo sa týka zvárateľnosti jednotlivých druhov kovov pomocou tejto metódy, tak zváranie elektrónovým lúčom je jednou z najvhodnejších metód z hľadiska zvárania odlišných materiálov, jedinou podmienkou je metalurgická kompatibilita. Veľkou výhodou je v tomto prípade zváranie vo vákuu, ktoré zabráňuje procesom oxidácie a vniku plynov a škodlivých elementov do zvaru. Z hľadiska nami použitých materiálov je pri oceliach dôležité ich ukludnenie, prípadne je potrebný predohrev kvôli riziku vzniku trhlín za tepla. [1,2]

Najväčšími výhodami tejto metódy sú:

- veľmi dobrý vzhľad zvaru a minimálna deformácia TOO
- ochrana zvaru pred vzdušnou atmosférou a rafinačné účinky vákua
- možnosť zvárania v neprístupných miestach
- zváranie na jeden priechod lúča [2]

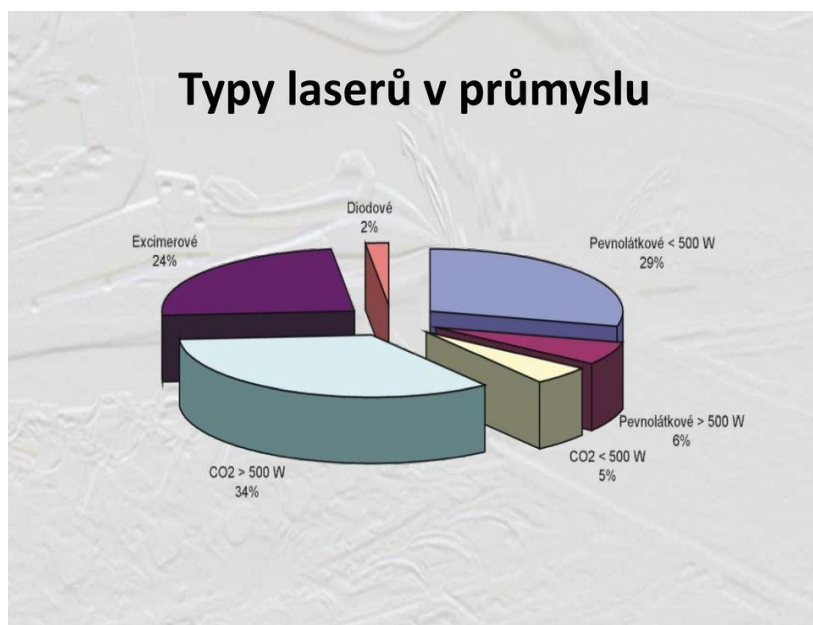
Okrem zvárania dokážeme elektrónový zväzok využiť aj na iné aplikácie. Jeho vysoký výkon dokážeme využiť pri dierovaní alebo rezaní materiálu. Častým javom je aj tepelné spracovanie, kedy dokážeme zakaliť povrchovú vrstvu vďaka rýchlemu ohrevu povrchu a prestupu tepla do jadra materiálu. Jednou z najzaujímavejších metód využitia je gravírovanie, kedy sa pretavené časti javia na povrchu ako tmavšie a dokážeme tak vykresliť požadovaný obraz. [4]

2.2.2. Zváranie laserom

Princíp metódy

Slovo LASER v preklade znamená zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia. Ide o žiarenie koncentrovaného svetelného lúča, ktorý dodáva na povrch základného materiálu teplo a vytvára zvarový spoj. Táto metóda patrí medzi tie, ktoré moc často nevyužívajú prídavný materiál ale skôr pretavujú steny zváraných materiálov a spájajú ich dokopy. Lúč je zdrojom elektromagnetickej energie, ktorú koncentrujeme bez zbytočného rozptylu a vytvárame tým potrebné teplo. Táto metóda je na rozdiel od predošlej metódy využívajúcej elektrónový zväzok schopná fungovať aj na vzduchu alebo v ochrannom plyne. Zváranie laserom so sebou prináša aj obrovskú výhodu čiastočnej rafinácie, kedy laser vyčistí zvarový kov a získame tým väčšiu

čistotu ako v základnom materiáli. [1]



obr. 2.5- podiel používaných laserov pri zváraní [19]

Postup vzniku a časti zariadenia

Základom pre vznik svetelného lúča u zariadenia využívajúceho laser je znalosť energetických hladín, kedy laser funguje na princípe trojhladinovej sústavy. V zdroji sa excitujú elektróny pomocou excitačného zdroja a dochádza k prechodu elektrónov z hladiny E_1 na E_3 v médiu a následne na hladinu E_2 . Pri interakcii s elektrónovým obalom sa ich energia zníži na pôvodnú hladinu E_1 a dochádza k uvoľneniu energie v podobe fotónu náhodným smerom. Aby sme však docielili výsledného zosilnenia vyžiareného fotónu, potrebujeme k tomu optické rezonátory. Pomocou rezonátoru dokážeme fotóny usmerniť do rovnakého smeru a dostatočne tak zvýšiť ich energiu. Na získanie energie pomocou laseru tým pádom potrebujeme 3 základné veci: médium, stimulačný zdroj a rezonančnú kavitu. Ako médium sa najčastejšie používajú umelé rubíny, hliníkové granáty dopované yttriom alebo zmesi plynov. V prípade stimulačného zdroja potrebujeme zariadenie, ktoré dokáže vytvárať záblesk na určitú krátku dobu. V praxi sa najčastejšie využívajú neónové a xenónové výbojky. Rezonančnú kavitu môžeme v odbornej literatúre nájsť aj pod názvom Perrotova-Fabryho optická kavita. [1,3]

Pri zváraní lúč vychádza pomocou zrkadiel do miesta zvarového spoja a pomocou mohutnej hustoty výkonu, ktorá môže dosahovať až $5 \cdot 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, vytvára kapiláru naplnenú parami kovu. Najvyšší výkon laseru je schopný v mnohých prípadoch úplne vypariť daný materiál a preto sa pre potreby zvárania využíva menšieho výkonu. Táto skutočnosť je však všeobecne výhodná pri materiáloch s vysokým bodom tavenia. Dôvodom, prečo je lepšie pretavenie a nie odparenie materiálu, je pohlcovanie energie fotónov vytváranou plazmou a bránenie prehriatiu spodných vrstiev. V prípade odparenia a vzniku plazmy sa využíva ochranných plynov na báze hélia a argónu na odfukovanie vzniknutej plazmy. [2,3]

Typy laserov:

Plynový laser

Tak ako už samotný názov napovedá, prostredie v ktorom je laser aktívny je plynné. Takéto typy laserov pracujú v kontinuálnom aj impulznom režime. Konkrétne typy laserov, ktoré sa zaraďujú do tejto metódy, sa označujú vo väčšine prípadov podľa plynu ktorý využívajú. Príkladom môžu byť jódový, vodíkový alebo hélium-kadmiový laser. Najčastejšie používané sú excimerové a CO₂ lasery. V prvom prípade ide o označenie pre typ plynu využívajúci dvojatómové molekuly, ktoré však môžu byť úplne odlišné. Tieto typy plynov majú malú vlnovú dĺžku a krátke trvanie pulzu, čo ich predurčuje k vyšším výkonom a väčšej variabilite použitia. Plyn môžeme plynulo dodávať zo zásobníka alebo môže dochádzať k recyklácii, kedy zachytávame použitý plyn a aplikujeme ho znovu. [1,2]

Prebytočné teplo, ktoré vzniká pri procese zvárania môžeme odvádzať tromi spôsobmi. Technológiou uzavretej nádoby, kedy je stenou optickej kavity odvádzané prebytočné teplo, ďalej pomocou axiálneho toku kde plyn prečerpávame do chladiča a nakoniec priečny tok, kedy dochádza k cirkulácii plynu mimo kavitu a následnému návratu späť. [1]

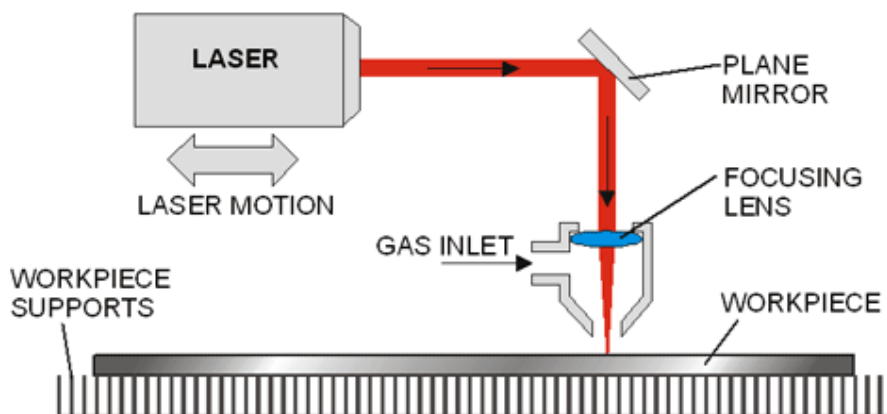
Druhý prípad laserov na báze CO₂ využíva ako hlavnú zložku samotný plyn alebo jeho zmes s héliom a dusíkom. Jeho účinnosť dosahuje maximálne 40% a práve kvôli tomuto dôvodu sa uvažuje nahradenie oxidom uhoľnatým CO, ktorého účinnosť je na hodnote 100%. Problémom sú však pracovné podmienky, kedy laser na báze CO funguje len v kryogénnych podmienkach. [1,2]

Pevnolátkové lasery

Na rozdiel od plynových laserov, pri pevnolátkových tvorí aktívne prostredie určitá opticky priepustná pevná látka. Zrkadlami vedený nekonzentrovateľný lúč prechádza cez technologickú hlavu, ktorá ho sústreďuje a navádza na zváraný materiál. V tomto prípade dokážeme využiť technológiu aj na väčšie vzdialenosti medzi zdrojom a miestom procesu zvárania, kedy je svetlo vedené svetlovodným káblom na danú vzdialenosť. Tento typ sa pre zváranie nepoužíva až tak často, prednosť má skôr pri rezaní alebo dierovaní. [1,2]

Polovodičové lasery

Fungujú na princípe polovodičových materiálov, v ktorých vytvárajú aktívne prostredie nerovnovážne elektróny a diery. V tomto prípade sa nedá očakávať ohromný výkon a hlboké pretavenie, preto sa skôr hodia na zváranie tenkých plechov. Ich účinnosť je v porovnaní s ostatnými na vyššej úrovni a dosahuje až 50%. Vyznačujú sa taktiež kompaktnou konštrukciou pri mechanickej robustnosti a veľmi častý dôvod použitia je široká možnosť ladenia spektrálneho pásma. [1]



obr. 2.6- zjednodušený princíp zvarovania pomocou laseru [20]

3. Experimentálne materiály použité v práci

3.1. Austenitické mangánové ocele (Hadfield)

Tento typ ocelí objavil a patentoval v roku 1882 Sir Robert Hadfield. Snažil sa vytvoriť materiál takých vlastností, aby mal dostatočnú tvrdosť a pevnosť povrchových vrstiev ale zároveň bol húževnatý v jadre namáhanej súčiastky. Vďaka svojim výnimočným vlastnostiam si tieto oceli získali svoje nenahraditeľné postavenie v priemysle a udržali si ho doteraz. Podľa dobových zdrojov bol sám Hadfield prekvapený zo svojich výsledkov natoľko, že tomu nechcel spočiatku uveriť a istotu nadobudol až po viacerých testovaniach. Testy jasne ukázali splnenie jeho požiadaviek a vytvorenie tejto jedinečnej ocele. [5,6]

Ich základným chemickým zložením je vysoký obsah mangánu od 11 do 14% a 0,7 až 1,45% uhlíka, čo im zaisťuje mikroštruktúru v podobe austenitických zŕn. Austenit ako majoritná fáza v matrici zaisťuje diamagnetické vlastnosti a dostatočnú húževnatosť materiálu. Materiál samotný je sám o sebe mäkký. Proces tvrdnutia a spevnenia nastáva až pri deformačných rázoch, ktoré vytvrdia povrch a materiál znesie náročné pracovné podmienky. Z tohto dôvodu majú vhodnú abrazivzdornosť a v prípade súčiastok je vysoký dôraz na čo najmenšiu potrebu opracovania po výrobe. [1,5]

Ďalšími prvkami, ktoré sa využívajú na dolegovanie môžu byť chróm a molybdén v množstve okolo 2% z hľadiska zvýšenia medze sklzu a hliník kvôli dezoxidácii ocele. [1,5]

Nevýhodou týchto ocelí je ich nízka tepelná vodivosť a vysoká tepelná rozťažnosť, čo komplikuje tepelné spracovanie na vytvorenie čisto austenitickej štruktúry. [5]

Zváranie tejto ocele je možné aj bez predohrevu. Odporúča sa však zváranie do teploty 320°C a čo najmenší tepelný príkon z dôvodu možnej precipitácie karbidickej zóny. Taktiež sa odporúča pred zvarovaním vyčistiť zvarovú plochu a odstrániť deformačne spevnený materiál. [1]

3.2. Feritické chrómové ocele

Hlavný podiel na výslednej štruktúre pri antikoročných oceliach majú prvky chróm, nikel a uhlík. Variáciou a podielom zloženia týchto prvkov v oceli nám tým pádom môže vzniknúť austenitická, martenzitická alebo feritická štruktúra. Feritické chrómové oceli majú mikroštruktúru zloženú z deltaferitu, ktorý sa pri obmedzenom množstve uhlíka a dusíka pod 0,0015 hm. % tvorí aj pri izbovej teplote. Teplota prekryštalizácie sa vďaka chrómu nachádza hlboko pod izbovou teplotou. Podiel chrómu pri oceliach zložených z feritickej štruktúry je vyšší ako 18% a ich hlavnou výhodou je vysoká odolnosť proti korózii. [7,8]

V porovnaní s austenitickými ocelami majú feritické ocele vyššiu medzu sklzu ale nižšiu ťažnosť. Z hľadiska výroby je ich veľkou prednosťou nízka cena, za čo vďaka zavedeniu sekundárnej metalurgie do priemyslu. Pred použitím tejto metódy bola výroba ocele s obsahom uhlíku pod 0,03 % technologicky aj finančne náročná. [1,5]

Z hľadiska tepelného spracovania dokážeme ťažnosť tejto ocele vylepšiť pomocou žihania na 750 °C, pričom ale nezvýšime jej húževnatosť. Dôvodom je náchylnosť feritickej štruktúry na vytváranie hrubých zŕn, ktoré bránia v zlepšení húževnatosti. Pri procese zvarovania môžeme vytváranie hrubozrnnej štruktúry čiastočne obmedziť pridaním molybdénu a titánu, ktoré podporujú nukleáciu a rast nových zŕn. Aj napriek tomu je ich účinok zanedbateľný. Z dôvodu vytvárania hrubého zrna v zvarovom kove aj v tepelne ovplyvnenej oblasti sa feritické oceli používajú pri zvaroch, ktoré nemajú podmienky vysokej húževnatosti. [7]

Pre tento typ ocelí sa po viacerých testovaniach vytvorili pravidlá a postupy, ktoré by mali obmedziť vytváranie degradačných spojov a väd v materiáli. Odporúča sa predohrev na 200 až 300 °C a minimálny tepelný príkon z dôvodu rastu veľkosti zrna v TOO. Po ukončení zvarovania by malo nasledovať popúšťanie pri teplote 700 °C z dôvodu zvýšenia ťažnosti. Ako prídavný materiál sa odporúča použiť materiál rovnakého zloženia, poprípade austenitické materiály. [1,7]

3.3. Ocele obvyklých akostí, nízkouhlíkové ocele pre zvarovanie

Zvarovanie ocelí s nízkym obsahom uhlíka bez legujúcich prvkov sa v dnešnej dobe využívajú menej v porovnaní s minulosťou. Ich kategorizácia a označenie je dané podľa normy ČSN EN 10113-1 až 3 a hlavným kritériom je zaistenie jasne definovaného obsahu uhlíka či maximálna medza sklzu. Veľmi často sa preto u nich stretávame s nežiadúcimi prvkami ako je fosfor a síra. Najčastejšie prvky využívané na mikrolegovanie sú niób, vanád a titán. [5,9]

Hlavným parametrom, ktorý určuje schopnosť zvárateľnosti materiálu je výpočet uhlíkového ekvivalentu, kedy doprovoďné prvky a hrúbka steny určujú či je zvarovanie možné alebo nie. Daný vzťah má tvar:

$$C_E = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{P}{2} + 0,0024t \quad (2)$$

t- hrúbka steny [mm]

Ďalším dôležitým parametrom je obsah uhlíka, ktorý nesmie prekročiť 0,2 hm. %, prípadne 0,25% v závislosti na hrúbke steny a hodnote uhlíkového ekvivalentu. V prípade hrubšej steny sa na ukladnenie využíva hliník, prípadne titán. [5]

Obmedzenie zvarovania nastáva taktiež pri výške tepelného príkonu, kedy pri oblúkových procesoch by sme nemali prekročiť 25 kJ/cm. V dnešnej dobe sa však do popredia čoraz viac dostávajú zdokonalené vysokopevné ocele, ktorých pevnosť a vhodné vlastnosti nesúvisia s obsahom uhlíka, ale získavame ich pomocou ostatných prvkov a mechanickým spevňovaním. Vďaka nízkemu obsahu uhlíka sa spĺňa kritérium zvárateľnosti a šetrí sa hmotnosť daných súčiastok. Vysokopevné ocele s nízkym obsahom uhlíka sa najčastejšie využívajú v automobilovom priemysle. [1]

4. Technológie pozorovania a analýzy materiálov

4.1. Metalografia

Prvým pozorovaním považovaným za metalografiu bolo v polovici 19. storočia skúmanie meteoritov a technického železa. Vykonával ho anglický mineralóg Henry Clifton Sorby a od tej doby sa jednotlivé techniky postupne zdokonaľovali do súčasnej podoby. Najčastejšími

spôsobmi pozorovania a analýzy štruktúry sú svetelná a elektrónová mikroskopia, a taktiež skúšky tvrdosti. Poskytujú nám vecné informácie o chemickom zložení, rozložení jednotlivých fáz či prítomnosť defektov v mikroštruktúre. Každá z týchto vymenovaných technológií je bližšie špecifikovaná nižšie a venuje sa im osobitný podnadpis. Pre pozorovanie materiálu sa vzorka pripravuje do preparátov podľa daných postupov, ktoré si teraz bližšie priblížime. Ich zavedenie dalo jasný obraz tomu, ako má príprava vyzerat' bez porušenia štruktúry vzorky počínajúc jej odberom a končiac leptaním. [10]

Odber a označenie vzorky

Najčastejším prístrojom pre odoberanie vzorky je v súčasnej dobe kotúčová píla s rezným prostredím na báze oxidu hlinitého Al_2O_3 uložený v zliatine železa. Samotný kotúč je chladený pomocou emulzie, čím dochádza k čo najmenšiemu treniu a zníži sa tak ohrievanie kotúča aj základného materiálu. Hlavným dôvodom je riziko tepelného ovplyvnenia odoberanej vzorky a riziko premeny fáz. Z tohto dôvodu sa neodporúča využívať rezanie kyslíkom alebo oblúkom. Vzorka musí byť odobraná na mieste, ktoré reprezentuje celkovú štruktúru a má v nej byť zastúpená každá zložka. Heterogénne štruktúry preto vyžadujú odber na viacerých miestach, pričom sa volí priečny aj pozdĺžny rez odberu a v špeciálnych prípadoch aj šikmý. U zváraných konštrukcií odoberáme vzorku primárne z oblasti samotného zvaru a tepelne ovplyvnenej oblasti. Po odbere nasleduje označenie vzorky, ktoré je v mnohých prípadoch podceňované a môže spôsobiť problémy pri následnej identifikácii alebo dlhodobom skladovaní. Vzorky označujeme razítkom, zaliatím značky do hmoty spolu so vzorkou alebo označením vzorky na hmotu. [10,11]



obr. 4.1- príklad kotúčovej píly od firmy Struers [21]

Zalievanie

Vzorky menších rozmerov môžeme zalievať do živice z dôvodu lepšieho manipulovania so vzorkou. Metódy zalievania sa rozdeľujú na zalievanie za tepla, za studena a vákuovou impregnáciou, pričom prvý typ je najrozšírenejší. Pri zalievaní za tepla ide o zalievanie vzoriek pomocou vzájomného pôsobenia teploty a tlaku elektrohydraulickým zariadením. Vysoká teplota roztaví prášok do okolia vzorky a tlak vytvára prevažne valcovitý rozmer preparátu. Využívame k tomu napríklad epoxidové živice alebo technický dentacryl. [10,11]

Brúsenie

Brúsením vzorky po zalievaní sa zbavíme väčších nerovností na materiáli, ktoré by nebolo možné odstrániť pri jemnejšom leštení. Prvé pokusy brúsenia prebiehali v suchom prostredí bez použitia zmáčadiel. Následnými pokusmi sa zistilo, že chladenie vodou zamedzuje väčšiemu

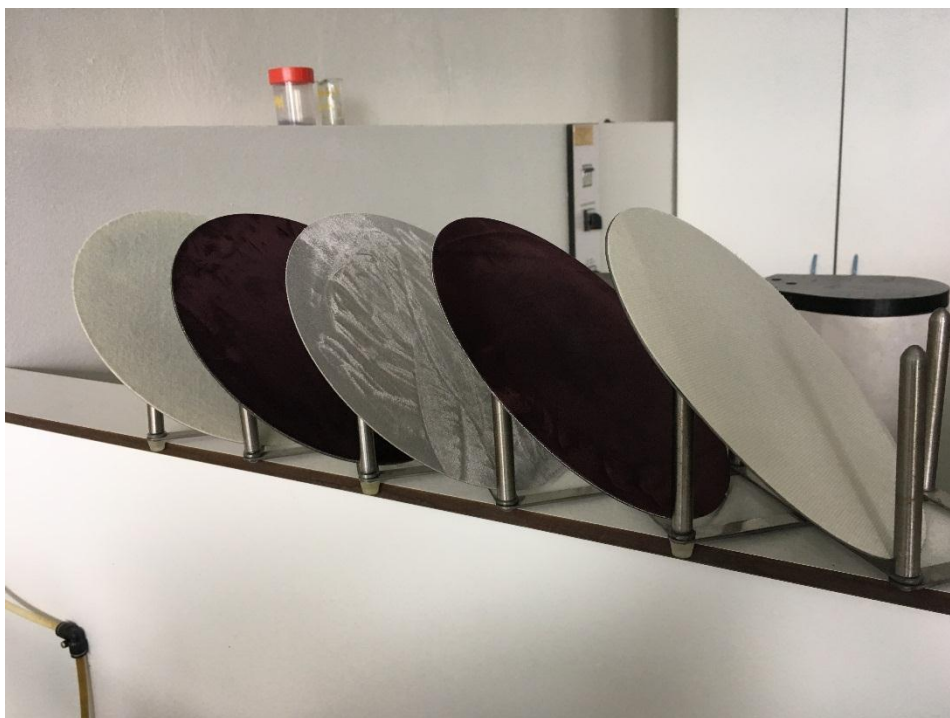
tepelnému ovplyvneniu a taktiež odvádza odbrúsené častice mimo brusný kotúč. Pri brúsení sa začína proces najhrubším brúsnym kotúčom a postupne prechádzame až k najjemnejšiemu. Využívame k tomu karbid kremíka, ktorý je nanesený na plátennej alebo papierovej podložke. [10]



obr. 4.2- poloaautomatická brúsička výbrusov od firmy Struers

Leštenie

Leštenie sa ako proces aplikuje hneď po brúsení a má za úlohu dosiahnuť lesklý zrkadlový odraz plochy. Taktiež má za úlohu odstrániť ryhy po brúsení a to už bez odoberania materiálu. Pri leštení dochádza len k zrovnaniu povrchovej vrstvy mechanickým, elektrolytickým alebo chemickým účinkom. Pri mechanickom leštení sa využívajú jemné leštiace kotúče potiahnuté rôznymi tkaninami, na ktoré sa aplikuje diamantová pasta s určenou veľkosťou zrn. Elektrolytické a chemické leštenie pracujú na podobnom princípe. V prípade chemického leštenia sa však neprivádza prúd a ich základom je anodické rozpúšťanie vzorky. [10,11]



obr.4.3- typy leštiacich kotúčov

Leptanie

Leptanie sa využíva na zviditeľnenie štruktúry po predošlých technologických operáciách. Odhalíme tým hranice jednotlivých zŕn, prípadne inak natočené kryštály k rovine výbrusu. Elektrolytické leptanie funguje na rovnakom princípe ako leštenie a využívame k tomu rovnaké zariadenia. Pri tepelnom leptaní dokážeme využiť vytvorenie oxidických vrstiev pri zvýšených teplotách, ktoré nám farebne odlišia jednotlivé typy zŕn. Najznámejším typom je chemické leptanie, ktoré funguje na princípe leptania povrchu silnými kyselinami. Posledným leptaním je iontové odprašovanie, kedy ióny Argónu využívame na porušovanie povrchu materiálu. [11]

4.2. Svetelná mikroskopia

Pri svetelnej mikroskopii ide o zobrazenie pozorovaného predmetu pomocou odrazeného viditeľného svetla. Deje sa tak pomocou šošoviek, ktoré rozdeľujeme na spojky a rozptylky. Z konkrétnejšieho hľadiska sa každý svetelný mikroskop skladá z objektívu, okuláru, clony a osvetľovacieho systému. Základnými parametrami na dostatočnú kvalitu pozorovania sú celkové zväčšenie obrazu, numerická apertúra objektívu a rozlíšiteľná vzdialenosť. Celkové zväčšenie vypočítame ako súčin zväčšení objektívu a okuláru v tvare:

$$Z_{celk.} = Z_{obj.} \cdot Z_{ok} \quad (3)$$

$Z_{celk.}$ -celkové zväčšenie

$Z_{obj.}$ - zväčšenie objektívu

$Z_{ok.}$ - zväčšenie okuláru [12]

Numerická apertúra nám určuje účinnú svetelnosť objektívu pomocou daných fyzikálnych veličín v tvare:

$$A = n \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

A-numerická apertúra

n- index lomu prostredia

$\sin \alpha$ -polovičný uhol objektívu [12]

V prípade zvýšenia indexu lomu môžeme pozorovať vzorku pomocou objektívu využívajúcim imerzný olej, kedy sa dostaneme na hodnoty indexu lomu približne 1,52. Poslednou vlastnosťou je rozlíšiteľná vzdialenosť, ktorá sa definuje ako najmenšia možná vzdialenosť dvoch bodov na pozorovanej vzorke, kedy ich ešte dokážeme od seba odlíšiť. Tá je daná vzťahom vlnovej dĺžky a numerickej apertúry:

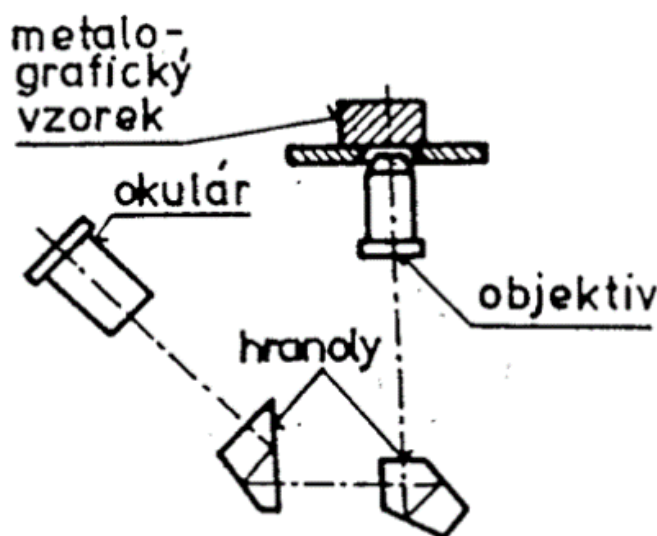
$$d_{min} = \frac{\lambda}{A} \quad (5)$$

d_{min} - rozlíšiteľná vzdialenosť

λ - vlnová dĺžka

A-numerickej apertúra [12]

Najčastejším typom pozorovania je normálny mikroskop, kedy sa objektív nachádza nad vzorkou. V druhom prípade ide o prevrátené La Chatelierovo usporiadanie a objektív sa nachádza pod vzorkou. [12]



obr. 4.4- princíp prevráteného usporiadania mikroskopu [12]

4.3. Elektrónová mikroskopia

Elektrónová mikroskopia spája určité vlastnosti svetelnej mikroskopie a zvárania elektrónovým lúčom dokopy. Jej základom je elektrónové delo, ktoré vysiela elektrónový lúč ako základ osvetľovacieho média. Pomocou fokusácie magnetickými šošovkami vytvárajúcimi magnetické pole dokážeme lúč usmerňovať na skúmaný materiál a po dopade lúča sledovať povrch materiálu pomocou sekundárne emitovaných a spätne odrazených elektrónov. Deje sa tak pri využití rastrovacieho elektrónového mikroskopu. V prípade transmisného využívame k pozorovaniu primárne transmitované elektróny. [14]

Elektrónový lúč má menšiu vlnovú dĺžku ako svetelný a vďaka tomu dokážeme získať neporovnateľne lepšiu rozlišovaciu schopnosť. Celý priebeh musí byť rovnako ako v prípade prístroja na zváranie pomocou elektrónového lúča vo vysokom stupni vákua. Využiť môžeme taktiež vyžiarené rtg. žiarenie, ktoré pomocou EDS spektrometra môžeme analyzovať a vytvoriť tak chemickú analýzu či už bodových, líniových alebo mapových častí materiálu. Podľa kvality a výkonu prístroja tak môžeme získať prehľad o množstve nachádzajúcich sa prvkov v materiálu od sodíka až po Urán. Moderné prístroje spájajú pozorovanie pomocou elektrónového mikroskopu a počítačový software na vyhodnotenie jednotlivých údajov, čím

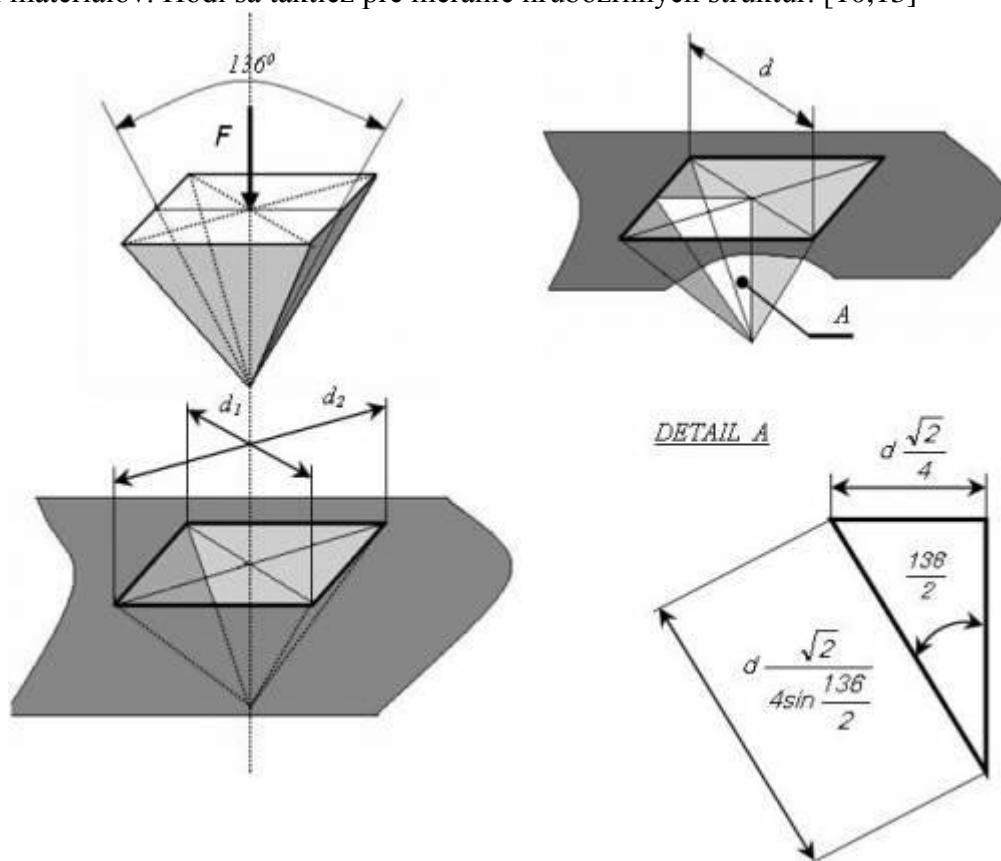
získavame prepracovanejšie pracovné prostredie na zachytávanie alebo pozorovanie jednotlivých štruktúr. [10,14]

4.4. Skúšky tvrdosti (mikrotvrdosti)

Skúšky tvrdosti majú výhodu vo vytvorení menšej deformácie na telese oproti skúškam v ťahu, takže vzorku je možné použiť naďalej v prevádzke aj po pozitívne vykonanej skúške. Sú veľmi rýchle a v priebehu vývoja sa ustálili 4 najspoľahlivejšie metódy testovania. Na test tvrdosti sa využíva indentor v podobe tvrdého materiálu, ktorý sa doňho vtíska s určitým prítlakom. Proces vtisku trvá určitú dobu a následné rozmery určujú hodnotu tvrdosti materiálu.

Tvrdosť podľa Brinella

Test využíva guľičku z tvrdokovu, ktorá sa zatláča do materiálu na požadovanú dobu a následne po vyjmutí sa zmeria vytvorený vtisk. Jej výhodou oproti metóde podľa Rockwella je možnosť merať tvrdosti na tvrdších materiáloch, pričom hodnotu vypočítame z tabuliek známych tvrdostí materiálov. Hodí sa taktiež pre meranie hrubozrnných štruktúr. [10,13]



obr. 4.5- zobrazenie skúšky podľa vickersa a nákres indentoru [22]

Tvrdosť podľa Vickersa

Pri teste podľa Vickersa vytvára potrebný vtisk diamantový ihlan. Meranie vtisku je podobné ako pri metóde podľa Brinella a pozostáva z prítlaku do materiálu na určitú dobu a následné premeranie rozmerov. Metóda oproti ostatným spomenutým dokáže zmerať širokú škálu tvrdostí a preto sa hodí pre viaceré typy materiálov. [13]

Tvrdosť podľa Rockwella

Meranie tvrdosti podľa Rockwella sa od predošlých spomínaných metód čiastočne odlišuje. V tomto prípade je spoločným znakom vytváranie vtisku v tvare guľičky alebo hranola podľa

typu indentoru a nedochádza k výpočtu tvrdosti veľkosťou vtisku. Namiesto toho sa využíva automatický prepočet podľa potreby prítlačnej sily a následný rozdiel prieniku do materiálu pri odlišných prítlakoch. Táto metóda vyniká svojou rýchlosťou, na druhej strane sa vďaka tomu vyznačuje aj najväčšou nepresnosťou.

Skúška mikrotvrdosti

Základom skúšky je meranie tvrdosti pomocou veľmi nízkej prítlačnej sily a navádzania pomocou prítomného mikroskopu. Vytvorený vtisk je veľmi malý oproti predošlým metódam a dokážeme tým skontrolovať tvrdosť aj v rozmerovo malej oblasti niektorej z fáz, samostatných zŕn či oblastí zvarových spojov. Na vytvorenie vtisku sa používa rovnaký indentor ako v prípade skúšky Vickersom alebo špeciálne tvarovaný ihlan, ktorý sa taktiež nazýva Knoopov indentor. [10,13]

5. Experimentálna časť

Cieľom bakalárskej práce bolo zhodnotenie mikroštruktúry zvarových spojov pomocou osvedčených metód materiálových vied. Bolo potrebné zhodnotiť vady vytvorené v materiáli a v závislosti na nich zistiť možnosti zvárateľnosti danej kombinácie materiálov. Jednotlivé metódy a ich špecifiká boli podrobnejšie opísané v nasledujúcej časti práce.

5.1. Zariadenie využívajúce elektrónový zväzok

Zváranie bolo vykonané dvakrát na prístroji PROBEAM K26, ktorý sa nachádza v NETME centre v Brne. Prvýkrát išlo o zváranie so zámerom prevariť materiály zhruba po polovici ich hrúbky. Parametre použité pre nastavenie prístroja pri tomto zváraní sú uvedené v tabuľke č.1. V druhom prípade bolo naplánované zváranie s použitím parametrov, ktoré mali zaručiť prevarenie materiálov celou hrúbkou. Hodnoty, ktoré sme použili sú taktiež uvedené v tabuľke č.1 a po porovnaní je zrejmé, že hlavným rozdielom oproti prvému procesu bolo použitie menšej rýchlosti pohybu lúča.



obr. 5.1-zariadenie PROBEAM K26 v NETME centre so sídlom v Brne

Tabuľka č.1- vstupné parametre pre oba procesy zvárania

Vstupné parametre	Vzorka č.1	Vzorka č.2
Napätie U [kV]	120	120
Prúd I [mA]	45	75
SURF [mA]	-4	-4
Frekvencia f [Hz]	500	500
Rýchlosť posuvu v [mm/s]	20	15

SURF- fokusačný prúd, ktorý sa pri hodnote 0 fokusuje na povrch materiálu

5.2. Experimentálny materiál

Vytvorené boli dva heterogénne spoje bez prídavného materiálu. V prvom prípade u vzorky č. 1 išlo o austenitickú mangánovú oceľ s prívlastkom Hadfieldova oceľ v spojení s uhlíkovou konštrukčnou oceľou. V druhom prípade bola antikorová chrómová oceľ so štruktúrou feritu spojená opäť s hadfieldovou oceľou. Vysoký podiel mangánu v tejto oceli stabilizuje v štruktúre FCC austenitickú mriežku bez prekryštalizácie. G-X 120 Mn12 je označenie hadfieldovej ocele. Ekvivalentom podľa normy DIN je 1,3401. [24] Pri uhlíkovej konštrukčnej oceli bola v dodanom stave štruktúra feriticko-perlitická do 0,5% uhlíku a hranicu prekryštalizácie je možné zistiť podľa binárneho diagramu. Podľa normy EN 10277-2 sa uhlíková oceľ označuje ako C45 a jej ekvivalentom môže byť 1.0503. U antikorovej ocele je základom deltaferit s BCC mriežkou vplyvom vysokého obsahu chrómu a tým pádom sa hodnota prekryštalizácie nachádza pod teplotou miestnosti. Antikorová oceľ nesie označenie X2CrMoTi18-2 a jej ekvivalentom je 1.4521. Nasledujúca tabuľka udáva hodnoty prvkov v polotovaroch podľa dodaných materiálových listov.

Tabuľka č.2- prehľad chemického zloženia polotovarov podľa mat. listov [24]

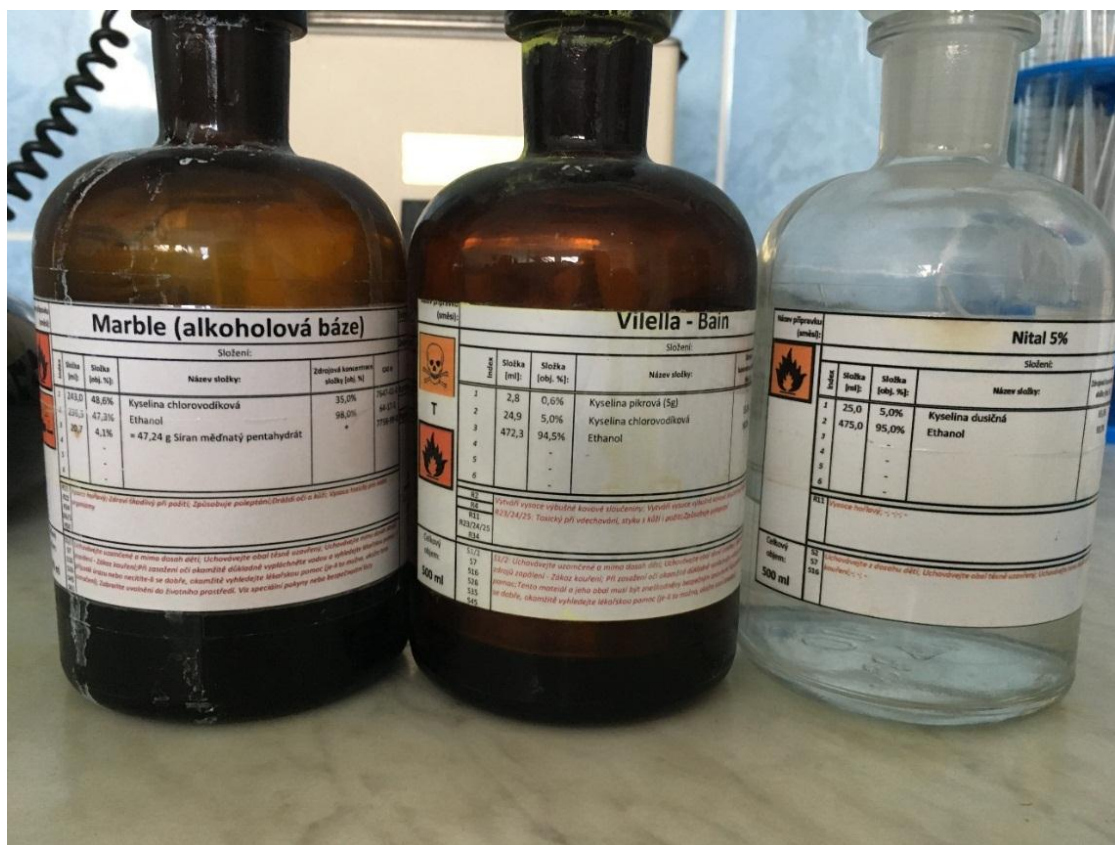
Materiál	Chemické zloženie [hm. %]			
	C	Mn	Cr	Si
Hadfieldova oceľ	1,09	12,8	0,09	0,41
Antikorová oceľ	0,025	1,0	18	1,0
Uhlíková oceľ	0,45	0,65	0,4	0,4



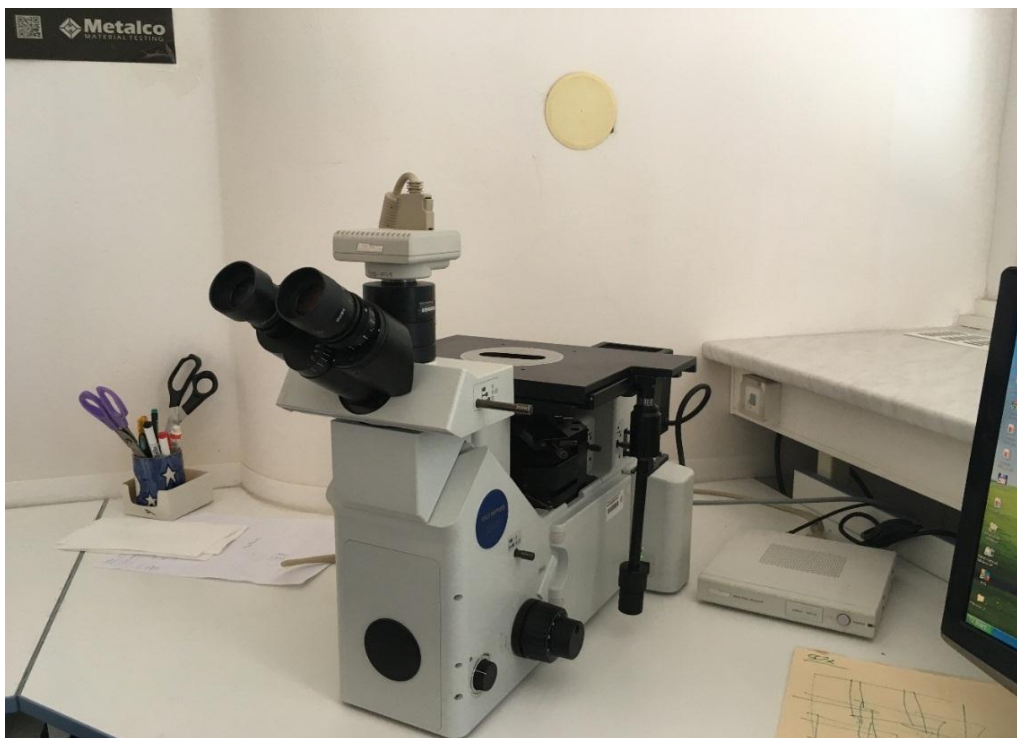
obr. 5.2 a 5.3- použitá vzorka č.1 (naľavo) a vzorka č.2 (napravo)

5.3. Technológie a postup analýzy vzoriek

Z obidvoch vzoriek boli vyrezané časti na vytvorenie metalografického výbrusu. Pre tento účel boli použité vzorky po prvom procese zvarenia. Nasledovalo zaliatie do živice a procesy brúsenia a leštenia. Pre brúsenie boli využité brúsne kotúče so zrnitosťou od 120 do 4000 s chladením pomocou vody a časovým intervalom 2 minúty na každú etapu brúsenia. Leštenie obsahovalo dve etapy s časovým intervalom 10 minút, pričom prvýkrát bol použitý leštiaci kotúč s 3 μm diamantovou pastou a v druhom prípade sme použili 1 μm diamantovú pastu. Posledným krokom bolo vyvolanie mikroštruktúry, ktoré sa značne skomplikovalo kvôli odlišnej chemickej odolnosti použitých ocelí. V prípade vzorky č.1 sa podarilo naleptať mikroštruktúru pomocou chemickej zlúčeniny Nital 5% s obsahom uvedeným na obr. 5.2.. U vzorky číslo 2 však nedošlo k požadovanému účinku a preto bol Nital nahradený leptadlom zvaným Marble. To však malo za účinnok preleptanie obidvoch základných materiálov a aj zvarového spoja a preto bolo potrebné odstrániť preleptanú vrstvu opätovným leštením. Ako najvhodnejšia varianta sa ukázala chemická zlúčenina zvaná Vilella bain, ktorej zloženie sa zakladá na množstve 0,5% kyseliny pikrovej. Konkrétne zloženie je zobrazené na obrázku číslo 5.2.. Po úspešnom naleptaní nasledovalo pozorovanie pomocou svetelného mikroskopu OLYMPUS GX 51.

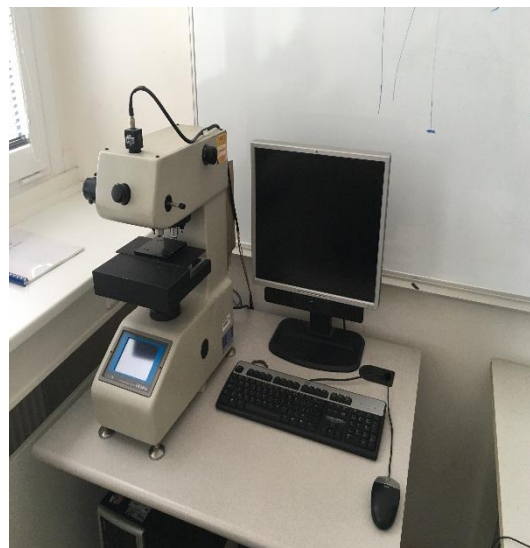


obr. 5.4- použité leptadlá a ich zloženie



obr. 5.5-svetelný mikroskop Olympus GX 51

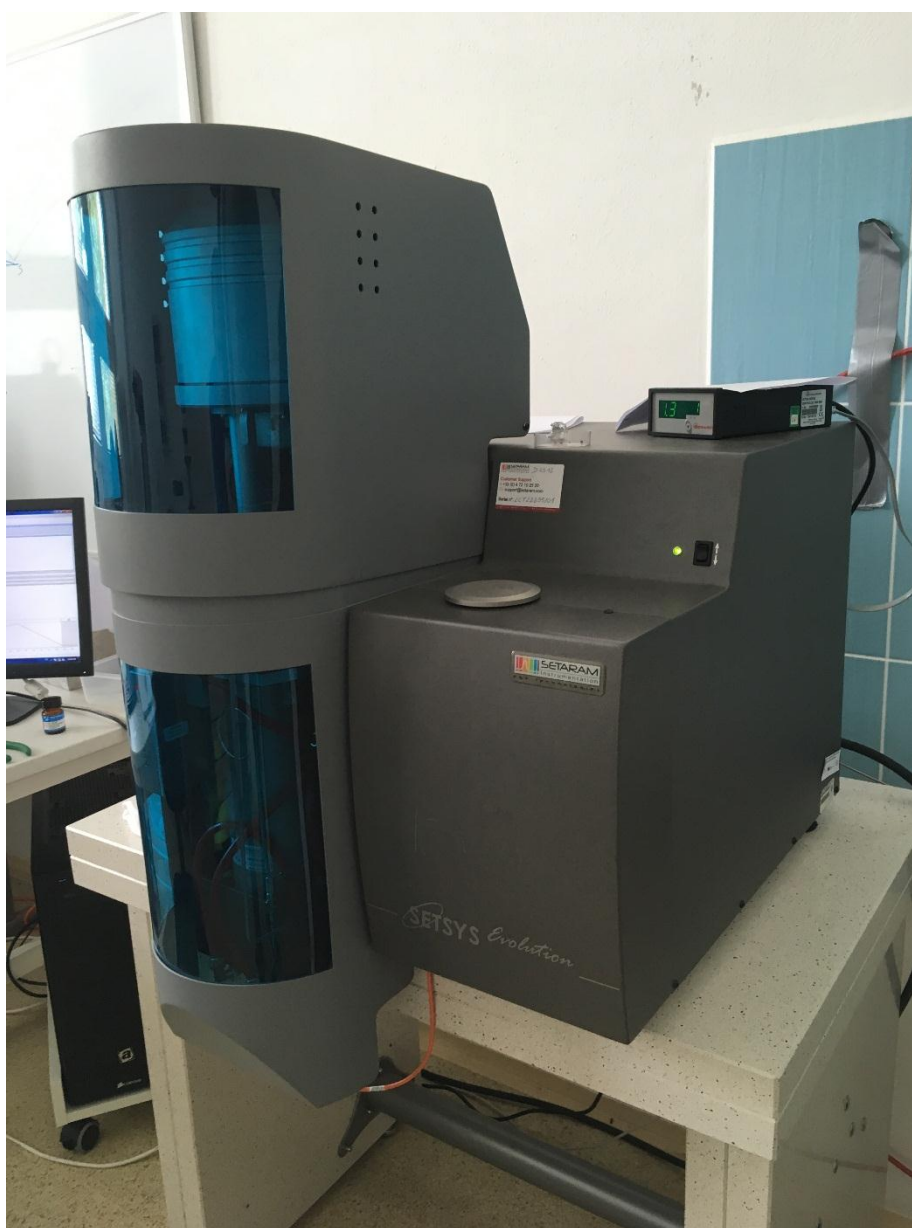
Svetelný mikroskop následne nahradil elektrónový, kde došlo k zisteniu lokálneho chemického zloženia pomocou bodovej, líniovej a mapovej EDS analýzy charakteristickej röntgenovým žiarením u vybraných častí povrchu. Oblasti zahŕňali základný materiál, tepelne ovplyvnenú oblasť aj zvarový kov. Taktiež bola nafotená mikroštruktúra novovzniknutých fáz pri svetelnej mikroskopii a vykonaná mikroštruktúrna analýza na podozrenie zo zakalenia zvarového spoja.



obr. 5.6 a 5.7-elektrónový mikroskop od firmy Zeiss a zariadenie Leco LM 247AT

Pre rozšírené získanie povedomia o vlastnostiach zvarového spoja a základného materiálu sme využili skúšku mikrotvrdosti na prístroji od firmy Leco. Využili sme k tomu indenter v tvare ihlanu a zaťaženie 0,2 kg. Doba zaťaženia bola 10 sekúnd a počet vpichov sa líšil od danej vzorky. Pri prvej vzorke sme sa rozhodli pre 60 vpichov v dvoch radách, pričom na každú pripadalo 30 so vzdialenosťou 0,1 mm medzi samotnými vpichmi. Druhá vzorka sa vyznačovala širším zvarom a preto bolo použitých 80 vpichov opäť v dvoch radách a pri rovnakej vzdialenosti.

Poslednou časťou experimentu bola DSC analýza pomocou pece s pracovným priestorom v ochrannom plyne argónu. Pec sníma tepelný tok medzi vzorkou a prázdny kelímkom a na základe toho zaznamenáva priebeh teplotného procesu. Pre obidve vzorky boli stanovené rovnaké podmienky, pričom priebeh spočíval v ohreve na 100°C a výdrži na tejto teplote 10 minút. Nasledovalo zvýšenie teploty na 1000°C, výdrž 10 minút a opätovné ochladenie na 100°C. Tento proces sme aplikovali dvakrát na každej vzorke a softvér pripojený na pec zaznamenal výsledné krivky zmien teploty.



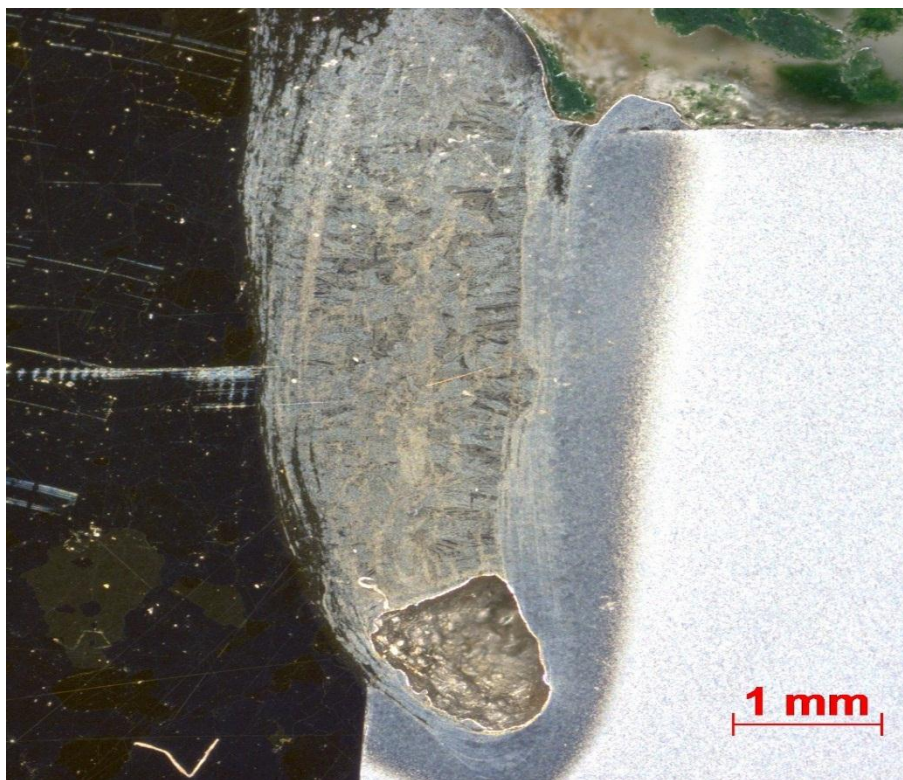
obr.5.8-vyobrazenie
pece na DSC
analýzu

6. Výsledky

Výsledky experimentov boli rozdelené podľa jednotlivých vzoriek do dvoch častí. Každá z nich obsahuje výsledný tvar zvarového spoja a jeho mikroštruktúru, analýzu elektrónovej mikroskopie a tvrdosť tepelne ovplyvnenej oblasti spolu so zvarovým kovom. Konečným prvkom je graf vykazujúci zmeny pri DSC analýze.

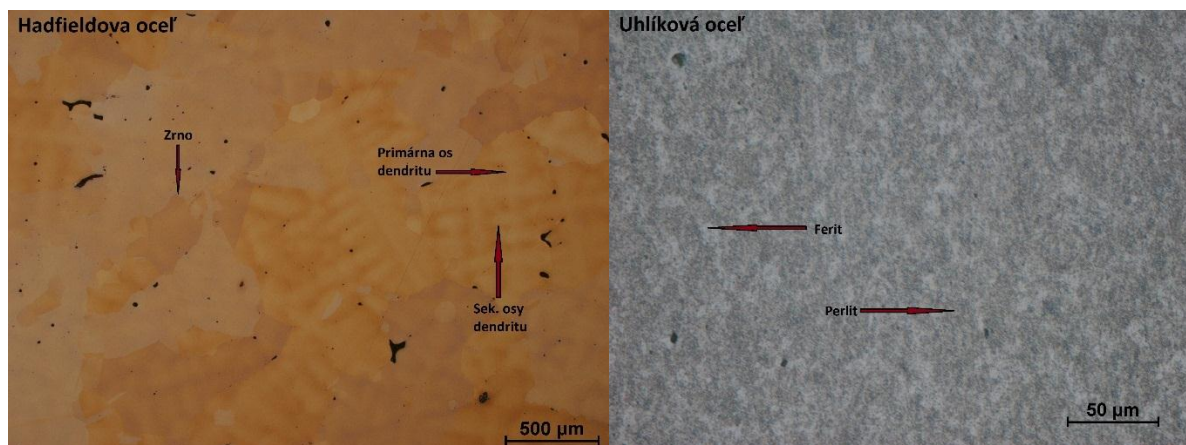
6.1. Vzorka č.1-Hadfieldova a uhlíková oceľ

Z dôvodu možnosti lepšej analýzy zvaru bol vytvorený širší zvar. Jeho výsledný tvar môžeme vidieť na priloženom obrázku číslo 6.1. Na obrázku môžeme vidieť vadu v podobe bubliny v spodnej časti zvarového spoja, ktorej vznik mohli zapríčiniť zle nastavené parametre. Zvyčajne k tomuto javu dochádza vplyvom väčšej rýchlosti pohybu elektrónového lúča.

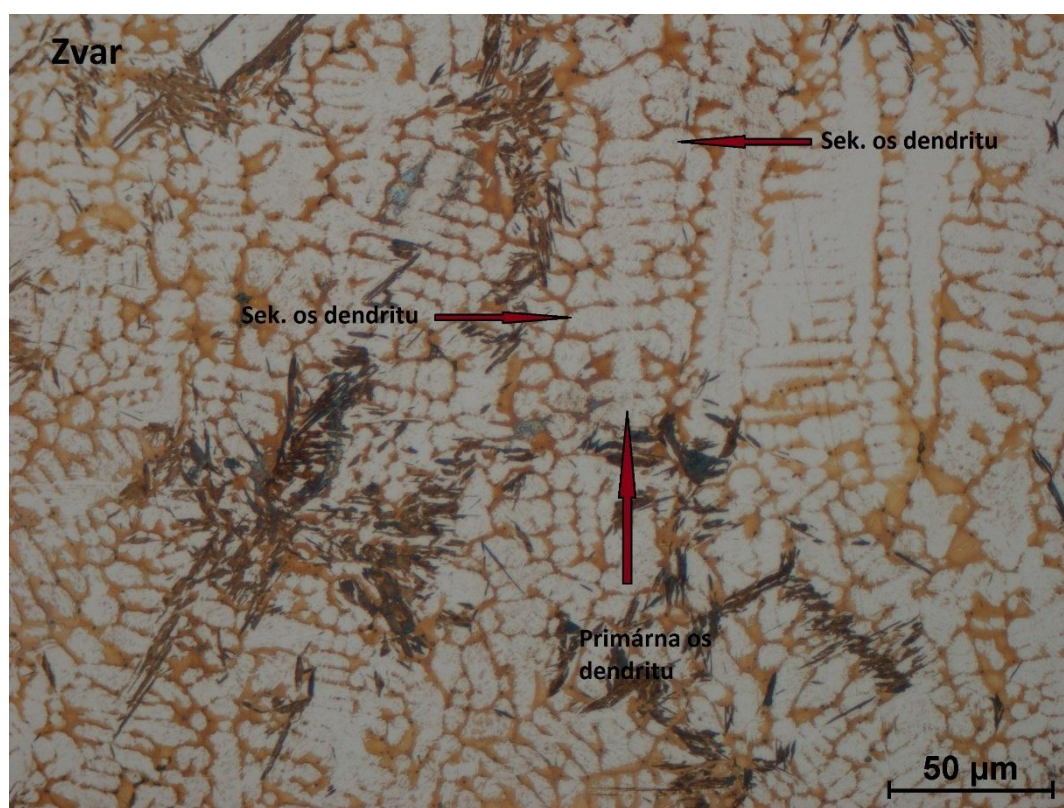


obr. 6.1-výsledný tvar rezu zvarového spoja

Obrázok rezu je vyhotovený stereolupou v naleptanom stave. Na ľavej strane sa nachádza hadfieldova oceľ a na pravej uhlíková konštrukčná oceľ. Môžeme si taktiež všimnúť výrazný rozdiel vo veľkosti tepelne ovplyvnených oblastí. Pri prechodovej oblasti zvaru a uhlíkovej ocele je táto oblasť výraznejšia ako v prípade prechodu hadfieldovej ocele z dôvodu prekryštalizácie a s ňou spojeným rizikom zvýšenej krehkosti. Mikroštruktúra hadfieldovej ocele je tvorená austenitickými zrnami a osami dendritov na rozdiel od uhlíkovej ocele, ktorej štruktúru tvorí zmes feritu a perlitu. V prípade zvaru tvorí výraznú časť dendritická štruktúra spolu so zakalenými časťami. Jednotlivé štruktúry môžeme vidieť na priložených obrázkoch, pričom si môžeme všimnúť odlišnú veľkosť zŕn a tým aj odlišnú potrebu zväčšenia. Uhlíková oceľ má podľa odfotenej mikroštruktúry a podielu perlitu v nej zvýšený podiel uhlíku oproti klasickým uhlíkovým oceliam určeným na zváranie. Tým pádom sa zvyšuje riziko funkčnosti zvarového spoja spojené s obsahom uhlíka do 0,2-0,25 hm. %C.



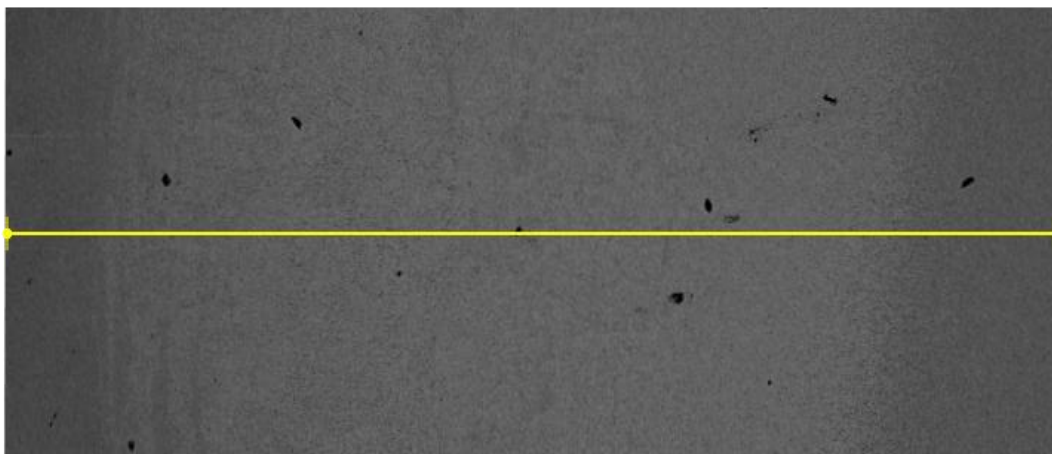
obr. 6.2 a 6.3- mikroštruktúra základných materiálov pri zväčšení 50x (obr. 6.2) a 500x (obr. 6.3)



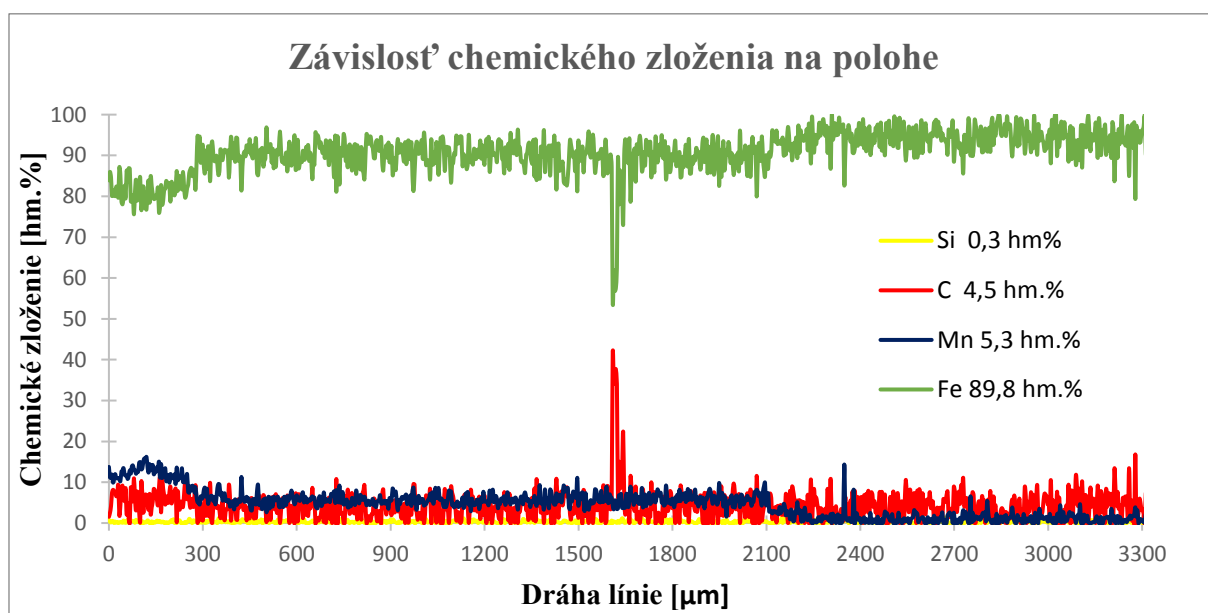
obr. 6.4- oblasť zvarového spoja pri zväčšení 500x

V oblasti zvaru sa okrem dendritov a pretavenej fáze nachádzala fáza, ktorú sme neboli schopní identifikovať pomocou svetelnej mikroskopie a jej naleptanie bolo takmer okamžité. Na obrázku 6.4 ju môžeme spoznať podľa čiernej farby znázorňujúcej zvýšenú náchylnosť k prepleptaniu. Vzhľadom na ihlicovitý tvar sme v tomto prípade mali podozrenie na prítomnosť martenzitu.

Nasledujúcim krokom bola uskutočnená analýza povrchu pomocou elektrónovej mikroskopie. Najdôležitejšou časťou bola líniová analýza chemického zloženia zvaru a blízkej oblasti pomocou EDS. Výsledný graf závislosti chemického zloženia na polohe línie dokazuje, že v zvarovom kove sa obidva materiály dostatočne premiešali a získali sme tak plnohodnotný zvarový kov.



obr. 6.5- náčrt líniovej analýzy (zvarový spoj sa nachádza v svetlejšej oblasti)



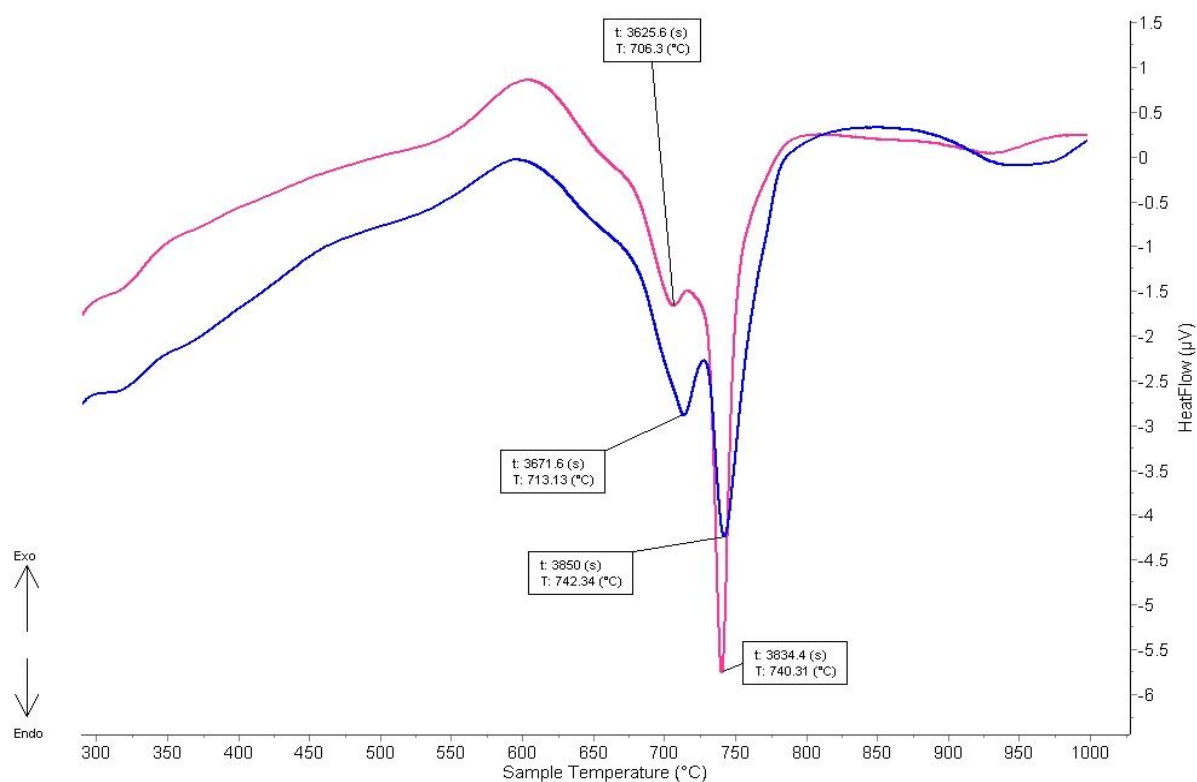
Graf č.1- závislosť chemického zloženia na polohe v zvarovom kove

Výsledný graf udáva hodnoty železa, mangánu, uhlíku a kremíku vo vzorke. Priemerné hodnoty sú uvedené v legende pri príslušných prvkoch. V prípade uhlíku je táto metóda nepresná a ako uhlík zaznamenáva aj rôzne nečistoty nachádzajúce sa na výbruse. Môžeme si všimnúť veľkého poklesu železa a nárastu uhlíku zhruba v strede línie. Tento jav je zapríčinený analýzou nečistoty a neuvádza dôvernú informáciu o zložení v tejto časti línie. V prípade ostatných častí však môžeme konštatovať, že prechod mangánu a železa zo základného materiálu cez zvarový kov až na minimálne hodnoty v uhlíkovej oceli je dostatočne viditeľný a zrejмый. Základné materiály teda boli dostatočne pretavené a preto sa metóda elektrónového zväzku z hľadiska možnosti zváratelnosti javí ako vhodná.

Čo sa týka výsledkov tvrdosti, tie sú zobrazené v grafe číslo 2 nachádzajúcim sa pod textom a jasne z neho vyplýva prítomnosť zakalenej časti tepelne ovplyvneného materiálu v blízkosti zvarového spoja. Tvrdosť materiálu a zvaru sa výrazne odlišuje a základný materiál môžeme rozpoznať pomocou viditeľne znížených hodnôt oproti zvarovému spoju a TOO. Vyššia tvrdosť a aj pevnosť spoja vytvára nežiadúci efekt, ktorého sa snažíme pri jeho vytváraní vyvarovať.



Posledná časť experimentu bolo zvýšenie teploty a sledovanie prebiehajúcich dejov pomocou DSC analýzy. Jej zobrazenie je podobné ako aj v predošlých výsledkoch rozdelené pre každý materiál osobitne. Primárnym cieľom bolo zvýšenie teploty na 1000 °C z dôvodu austenitizácie a možnej fázovej premeny.



Graf č.3- závislosť priebehu reakcií na teplote

Modrá krivka znázorňuje prvý ohrev na 1000 °C a červená druhý, ktorý nasledoval bez prestávky hneď po prvom. Ich tvar naznačuje, že priebeh teplotného deja a jednotlivé reakcie sa od seba príliš neodlišovali. Výraznejší rozdiel je len v prípade píkov v oblasti okolo 750°C.

Oba záznamy majú rovnaký charakter, vďaka čomu môžeme usudzovať, že pri ohrevoch nedochádza k vzniku fáz ktoré nie sú bezprostredne po zváraní vo vzorke prítomné. Je možné predpokladať fázovú zmenu odpovedajúcu eutektoidnej reakcii zvarového kovu v tejto oblasti, no na jej úplnú analýzu by bolo potrebné vykonať dodatočnú kontrolu mikroštruktúry ohrievaného kusu.

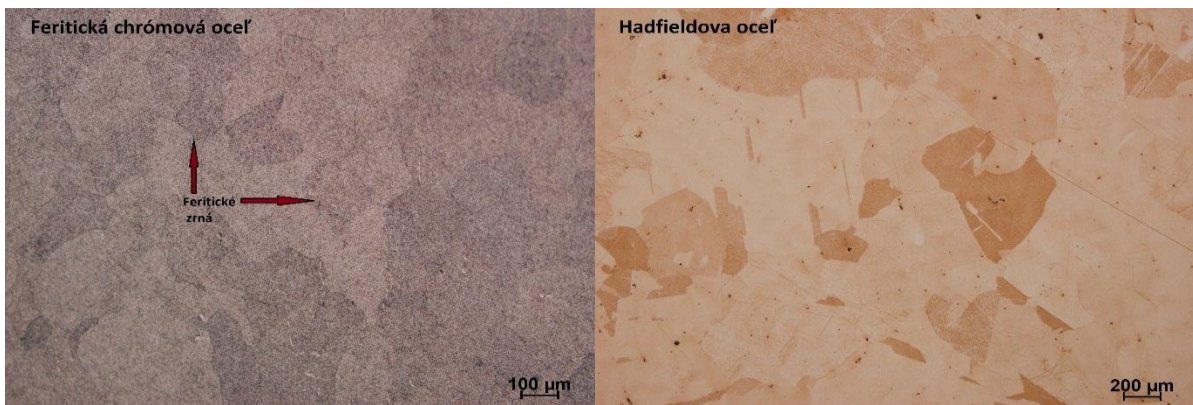
6.2. Vzorka č.2-Antikorózna a hadfieldova oceľ

U vzorky číslo 2 bol taktiež vykonaný zvar väčšej šírky z dôvodu lepšej možnosti vykonania analýzy. Výsledný tvar zvaru je zobrazený na obrázku číslo 6.6. Hlavným problémom sa pri tomto zvare stala trhlina, ktorá sa šíri skoro celou hrúbkou zvaru a jej identifikácia je možná v makroskopickom meradle. Prvým predpokladom bolo, že táto trhlina vznikla pôsobením pnutia pri tuhnutí zvarového kovu.

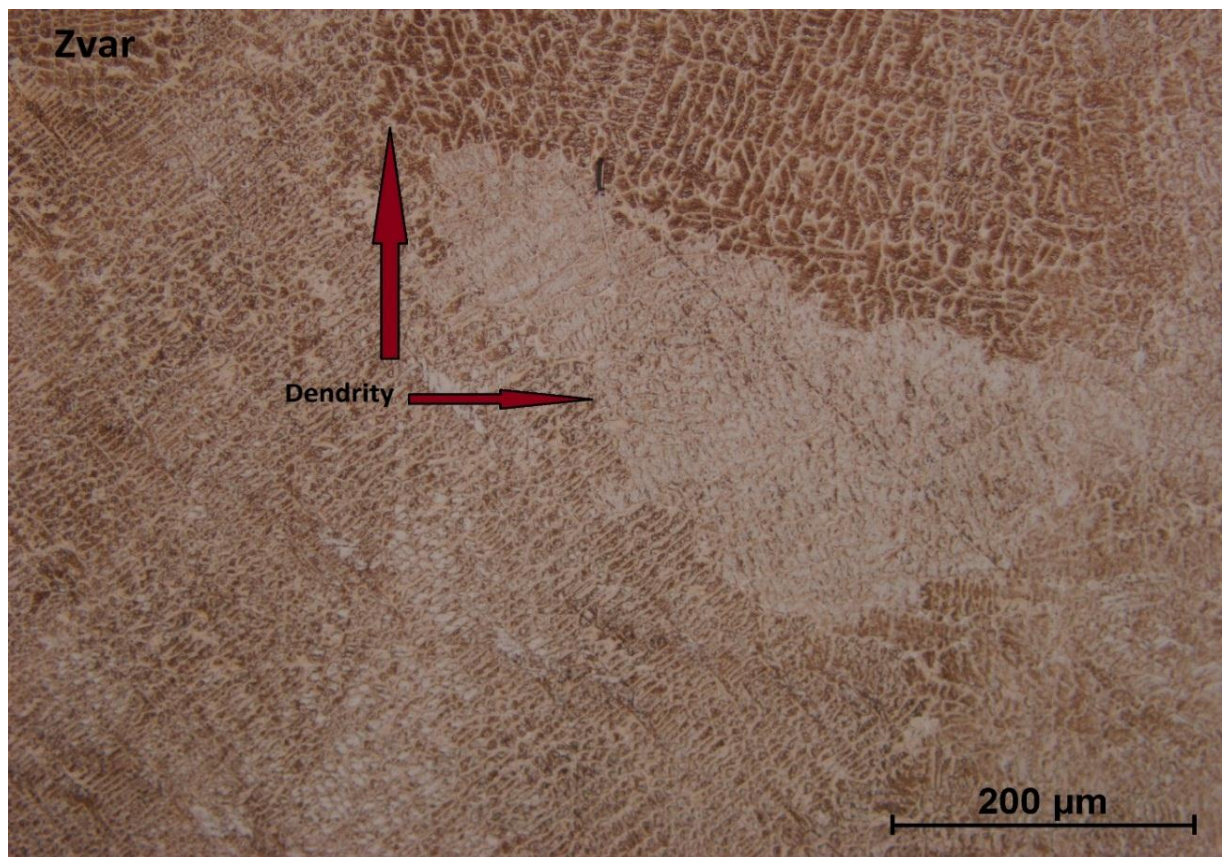


obr. 6.6-výsledný tvar rezu zvarového spoja

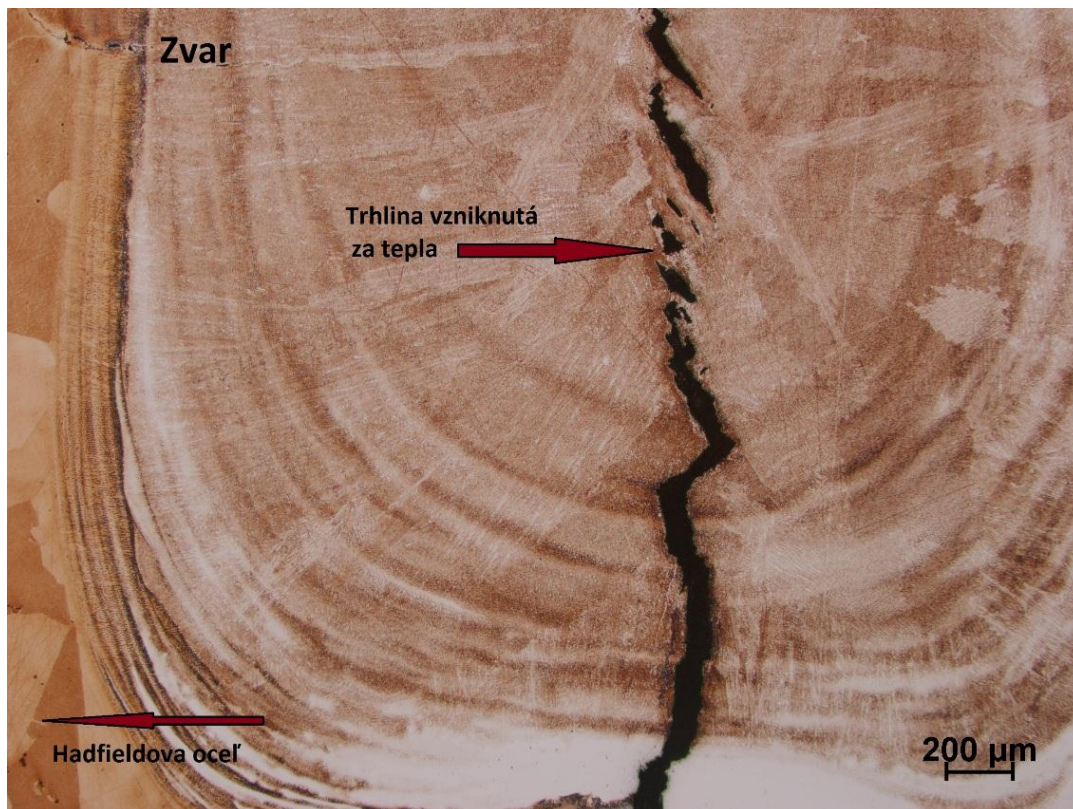
Samotný počiatok trhliny je viditeľný pri medzere medzi materiálmi pod pretaveným kovom. Naľavo od zvaru sa nachádza feritická chrómová oceľ a napravo môžeme vidieť austenitické zrná hadfieldovej mangánovej ocele. Rozdiel oproti vzorke číslo 1 je primárne vo veľkosti TOO. V prípade vzorky číslo 2 sú obidve oblasti menšie ako v prípade uhlíkovej ocele a to z dôvodu absencie fázovej premeny pri oboch materiáloch. Hadfieldova oceľ má štruktúru zaplnenú austenitickým zrnom a dendritickými stromčekmi. V prípade feritickej chrómovej ocele môžeme pozorovať zrná feritu v celej mikroštruktúre. Zvarový kov je následne zmesou dendritov, ktoré sa vytvorili pri chladnutí po zváraní.



obr. 6.7 a 6.8-mikroštruktúra základných materiálov pri zväčšení 50x(obr. 6.7) a 100x (obr. 6.8)



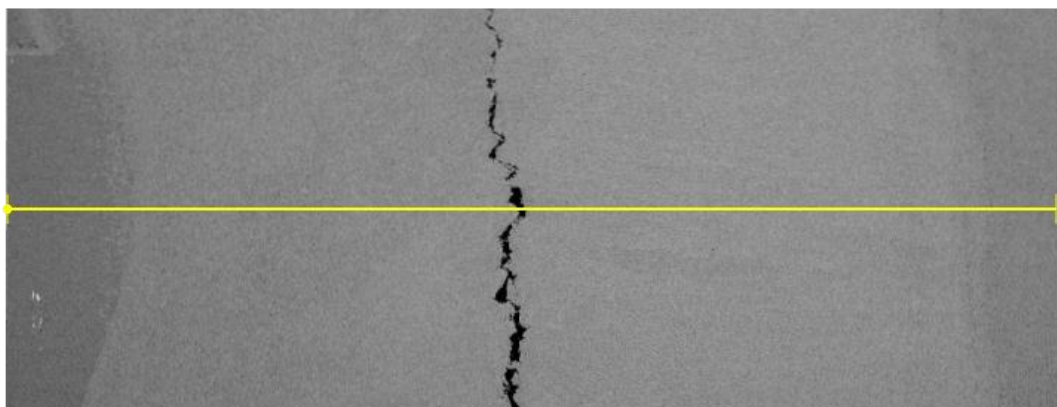
obr. 6.9-mikroštruktúra zvaru tvorená prevažne dendritickými stromčekmi pri zväčšení 200x



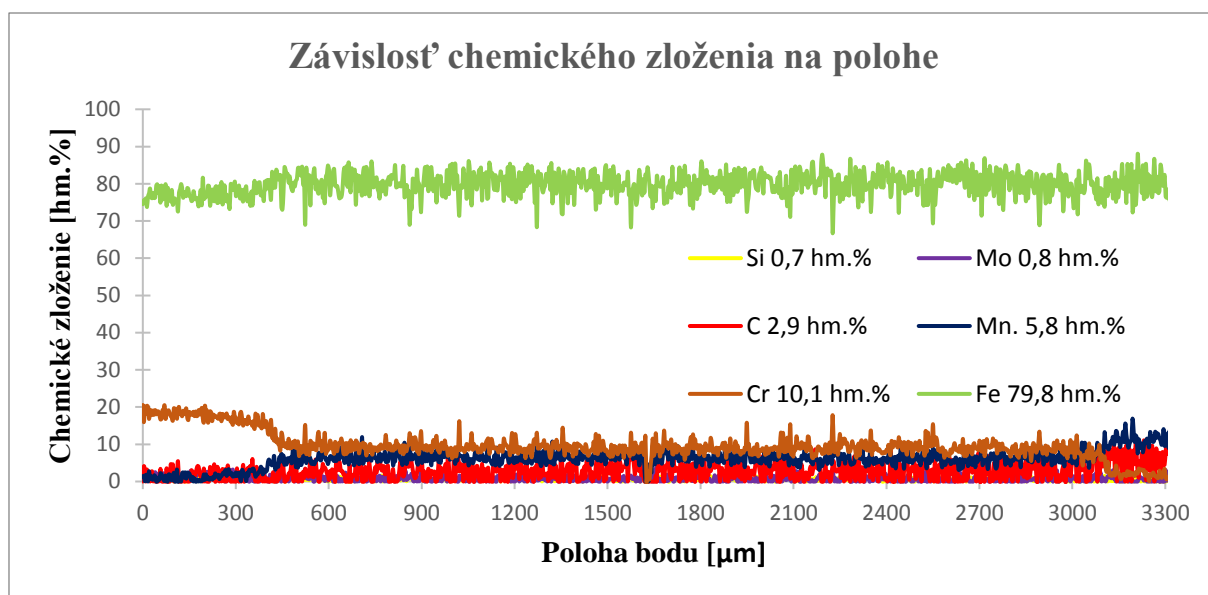
obr. 6.10-detail trhliny vo zvarovom spoji pri zväčšení 50x

Po analýze mikroštruktúry sme došli k záveru, že náš predpoklad bol správny a trhlina naozaj vznikla pôsobením pnutia pri tuhnutí kovu. Roztavený kov postupne tuhol smerom od stien do stredu zvaru a pri vytvorení ucelenej štruktúry bolo napätie vytvorené tepelným príkonom príliš vysoké, aby materiál odolal vytvoreniu trhliny.

Pri následnej chemickej analýze v elektrónovom mikroskope sa v oblasti trhliny chybné zobrazovali podiely jednotlivých prvkov, a preto sme hodnoty železa a uhlíku interpolovali podľa okolitých hodnôt. Dráha líniovej analýzy je zobrazená na obrázku číslo 6.11. Z následného grafu môžeme pozorovať hranice základného materiálu a podiel premiešaných prvkov v samotnom zvarovom spoji. Je zreteľné, že pretavenie bolo dostatočné a podiely jednotlivých prvkov odpovedajú priemerným hodnotám medzi zložením oboch spojovaných materiálov.



obr. 6.11- náčrt dráhy líniovej analýzy cez základné materiály a zvar

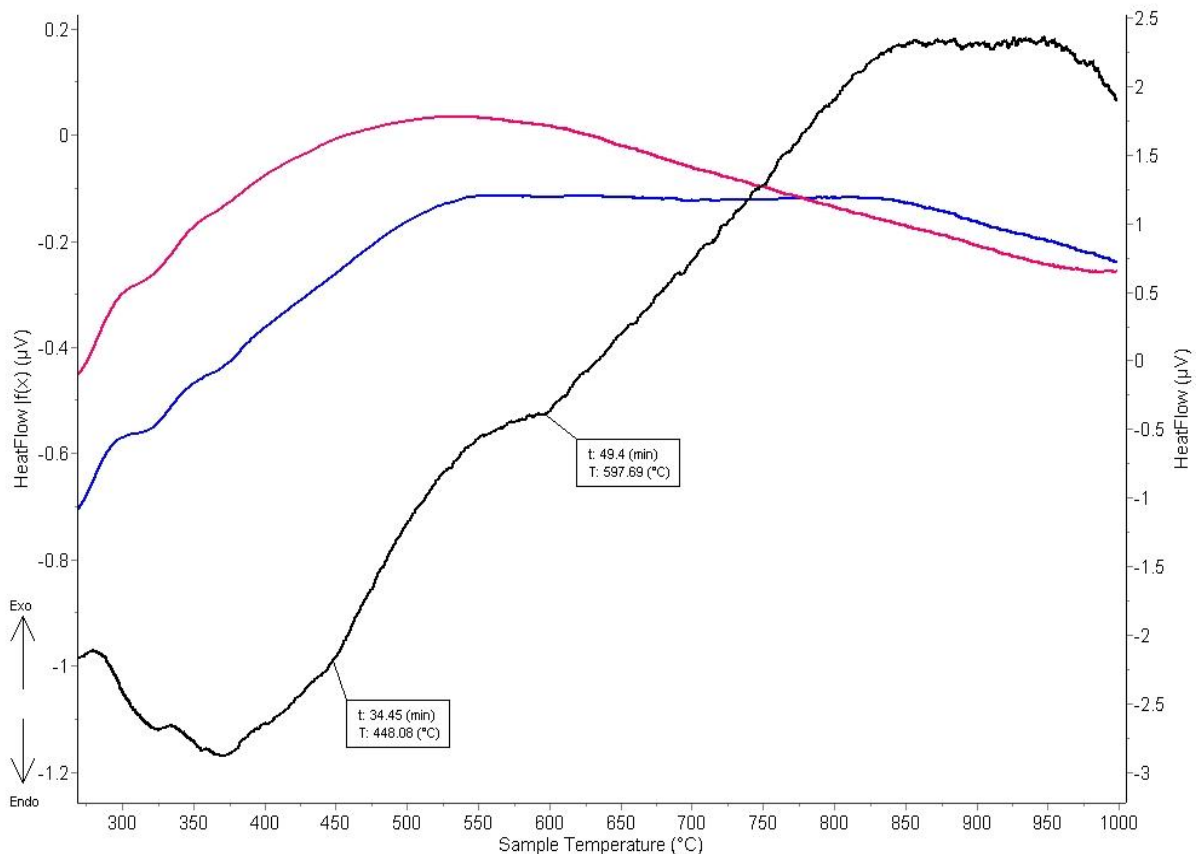


Graf č.4-závislosť chemického zloženia na polohe v zvarovom kove

Priebeh tvrdosti je zachytený v grafe číslo 5, ktorého pre nás hlavnou informáciou je väčšia tvrdosť zvaru oproti základným materiálom. Dochádza teda k podobnej situácii ako u vzorky číslo 1, kedy narastá riziko funkčnosti vzhľadom k zvýšenej krehkosti spoja.



Priebeh DSC analýzy u tejto vzorky je nevykazuje intenzívny pík pre polymorfnú premenu ako tomu bolo u predošlého spoja. Tvar krivky pri prvom aj druhom ohreve sa výrazne nelíšia. Nepatrným rozdielom môže byť veľkosť oblúka, ktorým sa jednotlivé ohrevy od seba odlišujú. Krivka čiernej farby symbolizuje rozdiely medzi týmito krivkami a 2 zaznamenané deje pri rozdielnych teplotách v oblasti 448 a 597 °C. Jedná sa o endotermné píky, vďaka čomu prichádza do úvahy rozpúšťanie častíc v zvarovom kove. Pri danom procese tieto častice neboli v materiáli prítomné bezprostredne po zvarení.

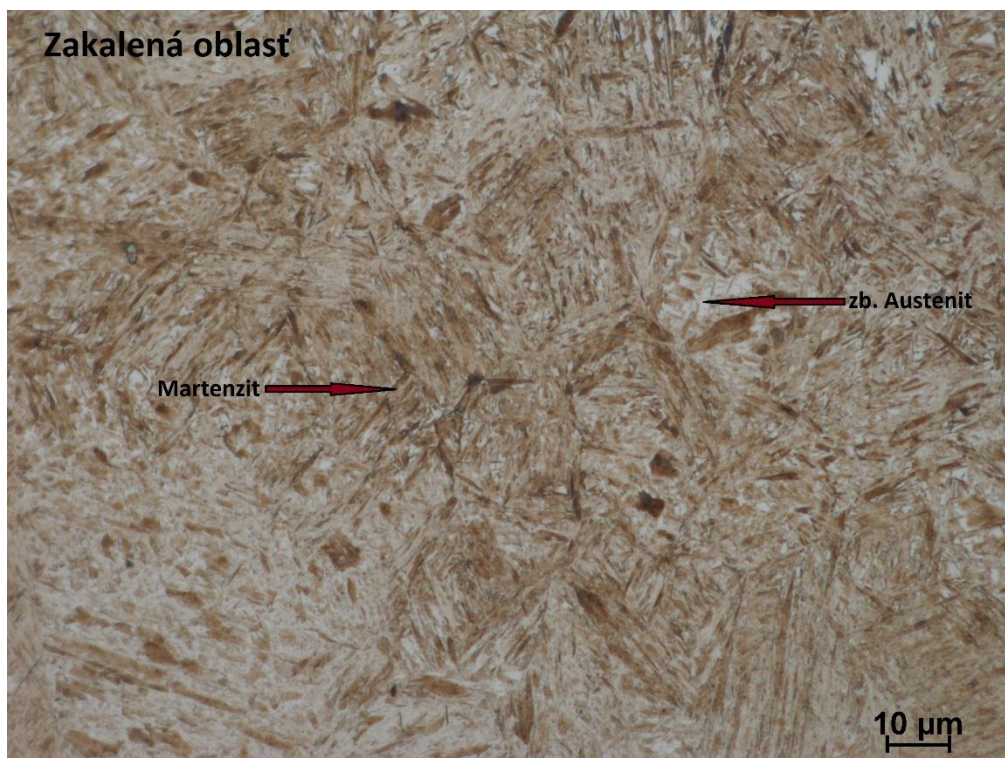


Graf č.6- závislosť priebehu reakcií na teplote

7. Diskusia

Vytvorené zvarové spoje vykazovali od začiatku vady neprípustné pre funkčnosť v prevádzke. Z hľadiska materiálu by mohol byť u prvej vzorky problém s uhlíkovou konštrukčnou oceľou, u ktorej zvýšený obsah uhlíka pri rýchlom ochladení na jednej strane vplyvom martenzitickej transformácie spevní zvarový spoj, no na druhej sa stane krehkejším (obr. 7.1). Pri dostatočnom predohreve sa predpokladá možnosť zvárania uhlíkovej ocele až do 0,5 hm.% C. [1]

Hadfieldova oceľ nie je primárne určená na zváranie a premiešanie zvarového kovu spolu s uhlíkovou oceľou nemusí byť ideálne. Vo vzorke sme mohli taktiež pozorovať martenzitickú štruktúru v tepelne ovplyvnenej oblasti, čo nenapomáha funkčnosti zvaru ako takého. V rámci druhej vzorky bolo zrejme, že absencia predohrevu mala za následok vznik trhliny. Príčinou problému mohlo byť taktiež použitie feritickej chrómovej ocele, ktorá výskytom feritu vytvára hrubozrnnú štruktúru a tá má za následok vznik krehkosti u zvarov.[5,7] Táto oceľ sa odporúča zvärať iba s materiálmi podobného zloženia alebo s materiálmi s austenitickou štruktúrou, čo sme však v našom prípade splnili. [1] Pri parametroch zvárania bolo rozhodujúcim faktorom určenie rýchlosti pohybu elektrónového lúča. Voľba menšej rýchlosti pri prvom zváraní mohla zamedziť vzniku bubliny a vytvoriť funkčný zvar. Samotná optimalizácia by však musela byť omnoho precíznejšia, než len zmena jedného parametra, preto je častým javom časovo náročnejšia príprava procesu než proces samotný.

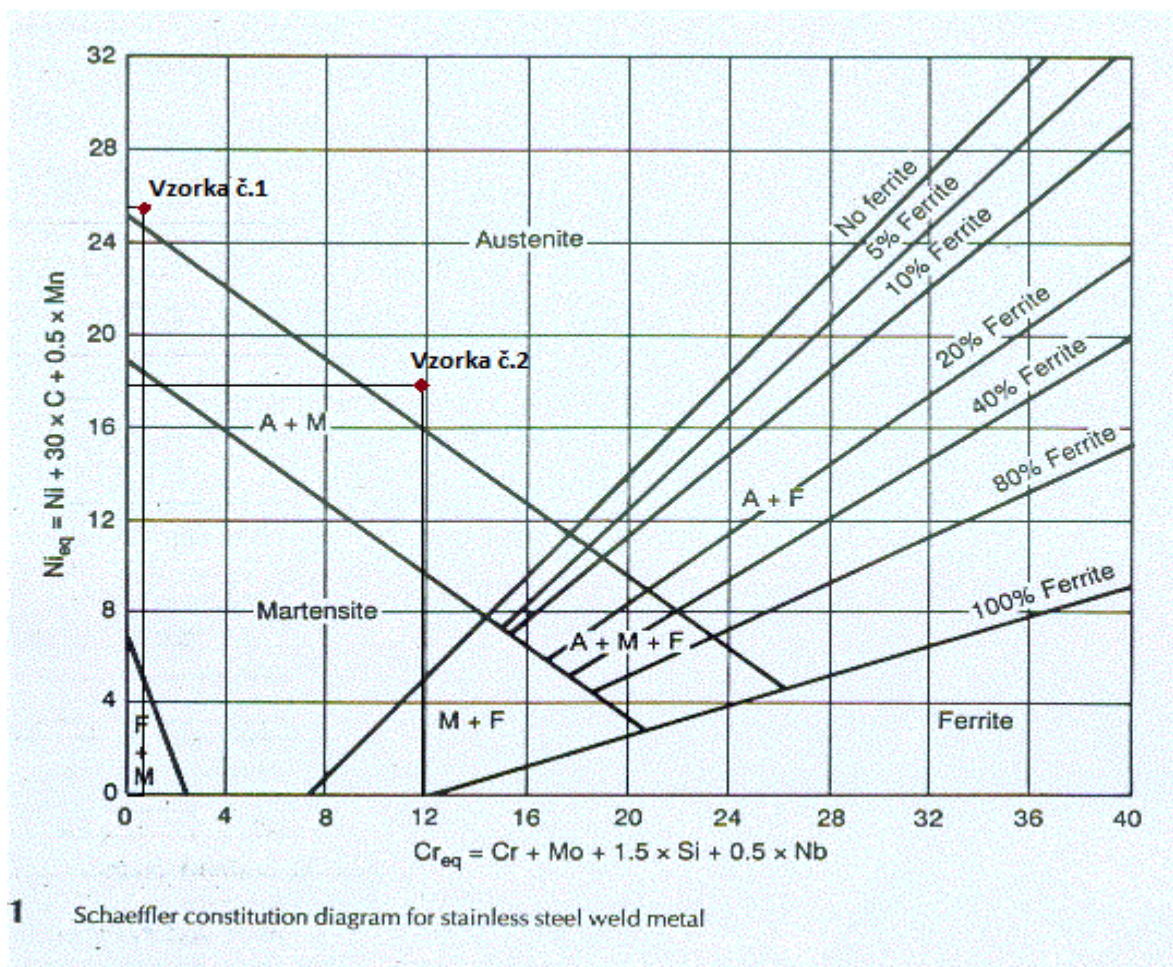


obr. 7.1- prítomnosť zakaleného martenzitu v prechodovej oblasti vzorky č.1

Ďalší problém, ktorý však nebolo možné naisto vyriešiť u vzorky číslo 1 bolo podozrenie na zakalenú štruktúru v oblasti zvaru. V tomto prípade nebolo možné určiť druh prítomnej fáze pomocou svetelnej mikroskopie. Po vykonanej bodovej analýze na 7 miestach neznámej štruktúry vysvitlo, že bola tvorená 2 až 7 hm.% mangánu v závislosti na polohe bodu. Zobrazenie miesta analýzy sa nachádza na obrázku 7.3. V teoretickej rovine by sa problém s výslednými štruktúrami zvarov mohol vyriešiť pomocou Schäfflerovho diagramu, kedy chrómové a niklové ekvivalenty poukážu na výslednú štruktúru. Vzhľadom k vykonaným meraniam je možné chemické zloženie zvarového kovu určiť ako aritmetický priemer zloženia oboch spojených materiálov. Jednotlivé zastúpenie chemických prvkov v rovniciach bolo vytvorené buď z výsledkov predošlej chemickej analýzy alebo pomocou stredných hodnôt prvkov z materiálových listov. Z hodnôt vyplýva, že štruktúry oboch zvarových kovov by mali byť austenitické. Hodnoty sú však veľmi blízko hranice s austeniticko-martenzitickou štruktúrou, čo posilňuje podozrenie na martenzit v prípade vzorky číslo 1. Doplnené hodnoty do rovníc sa nachádzajú v tabuľke číslo 3 a zakreslenie do Schäfflerovho diagramu na obrázku číslo 7.2.

Tabuľka č.3- hodnoty použité pre výpočet Schläfflerovho diagramu

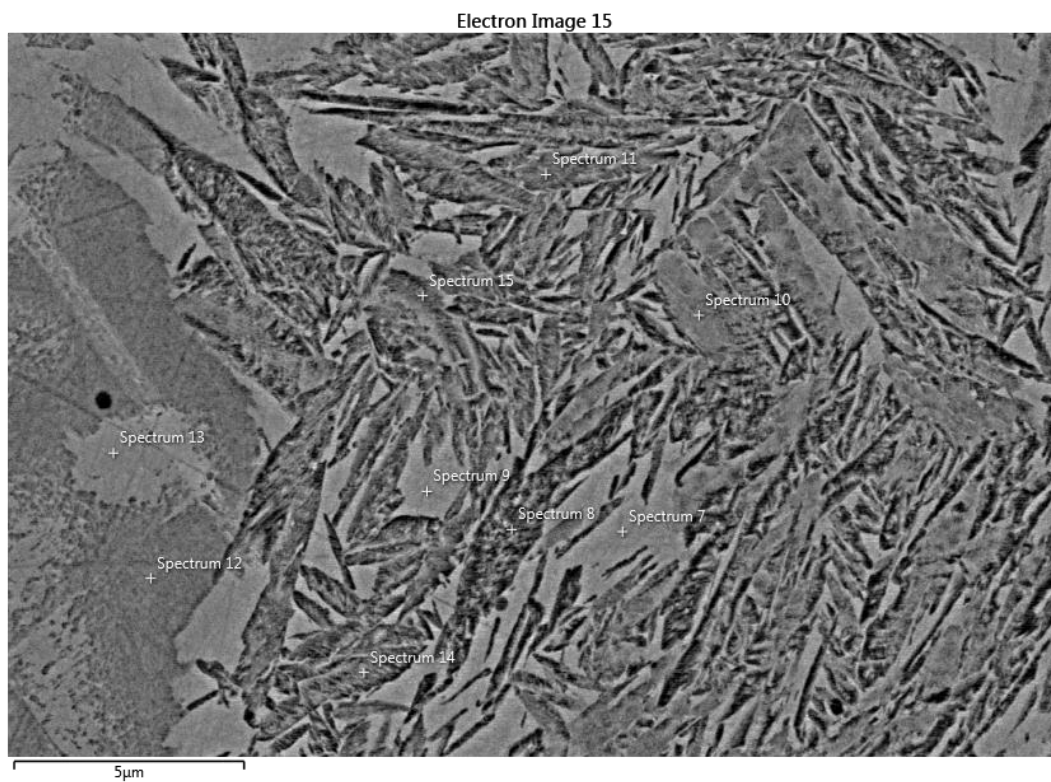
Vzorka č.1-hodnoty vyjadrené v hm. %								
Cr	Mo	Si	Nb	Ni	C	Mn	Cr _{ekv}	Ni _{ekv}
0,2	0	0,3	0	0,3	0,75	5,3	0,65	25,45
Vzorka č.2-hodnoty vyjadrené v hm. %								
Cr	Mo	Si	Nb	Ni	C	Mn	Cr _{ekv}	Ni _{ekv}
10,1	0,8	0,7	0	0	0,5	5,8	11,95	17,9



obr.7.2-zakreslenie výsledných štruktúr do Schäfflerovho diagramu [23]

Je nutné podotknúť, že výsledná štruktúra môže byť rozdielna od teoretického výsledku vzhľadom na odhadnuté hodnoty z dostupných zdrojov, a preto vyjadrenie pomocou diagramu slúži len na predstavu a možnosť ďalšej diskusie. Nikel ako chýbajúci chemický prvok zhoršuje určenie niklového ekvivalentu, čím vznikajú pochybnosti o pravdivostnej hodnote teórie. Preto by bolo vhodné vytvoriť podobný diagram na primárnej báze zastúpených prvkov.

Čo sa týka DSC analýzy, grafy nevykazujú väčšie rozdiely kriviek prvého a druhého ohrevu a tým pádom ani výraznejšie premeny v materiáli. U prvej vzorky je zrejmé, že premeny nastali v oblasti dvoch endotermných pík, ktoré odpovedajú približnej eutektoidnej teplote. Pri druhej vzorke však nastáva zvláštna situácia, kedy materiál nejaví žiadne silnejšie endo alebo exotermické reakcie. Tým pádom by bolo možné, že kov vzniknutý pretavením oboch materiálov je natoľko stabilný, že aj napriek vysokým teplotám nedochádza k jeho prekryštalizácii. Vyvrátiť naše domnienky by mohol jedine metalografický výbrus a s ním spojená analýza mikroštruktúry, ktorá by nám potvrdila či boli vyrezané časti naozaj zo samotného zvarového kovu, alebo šlo len o časti základného materiálu. Pri vytváraní vhodnej vzorky do DSC pece totiž potrebujeme výrez o priemere menšom ako 4 mm a preto môže dôjsť k zámene materiálov pri jeho vytváraní. Ďalšou z vecí, ktorá by dokázala zlepšiť celý experiment, by bola bezpochyby voľba rovnakého miesta pre skúšku tvrdosti aj líniovú analýzu chemického zloženia. Jednotlivé výsledky by sa tak lepšie dali porovnať a získali by sme lepší prehľad o situácii v materiáli. Ku jednoznačnému záveru by nám napomohlo aj detailnejšie preskúmanie všetkých faktorov zvaru. Primárnou nevyriešenou otázkou je fázové zloženie zvarových kovov a stabilita ich mikroštruktúry. Vzhľadom k rozsahu práce však nebolo možné využitie iných metód a preto sa celá práca opiera o výsledky z vyššie spomínaných analýz.



obr. 7.3- zobrazenie štruktúry vzorky číslo 1 v elektrónovom mikroskope

8. Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo zhodnotiť mikroštruktúru zvarov a ich stabilitu pomocou metód z oblasti materiálových vied. V oboch prípadoch sa podarilo vytvoriť zvarové spoje, kde zvarový kov má chemické zloženie medzi zložením oboch spojovaných materiálov. Podiel jednotlivých prvkov však mal za následok vytvorenie tvrdšej štruktúry, ktorá môže spôsobiť nežiadúci efekt krehkosti a zvýšené riziko nefunkčnosti spoja. Vzhľadom k tomu, že nebola aplikovaná žiadna optimalizácia procesu zvárania a jeho parametrov, konkrétne zvary analyzované v práci vykazujú vady, ktoré nemôžu byť klasifikované ako prijateľné a zvarové spoje nepreukázali svoju funkčnosť. V prvom prípade došlo k vzniku bubliny, ktorá spôsobila oslabenie spoja. V druhom prípade vznikla trhlina za tepla, ktorá sa šírila celou hrúbkou zvaru a pri väčšom namáhaní by mohlo dôjsť k lomu spoja. Vzniknuté problémy by bolo teoreticky možné odstrániť predohrevom na určitú teplotu alebo zmenou parametrov elektrónového lúča. Ohriatie zvarového kovu na teplotu 1000 °C v dvoch fázach neprinieslo výraznejšie zmeny a pre podrobnejšie výsledky analýzy by bolo potrebné spraviť metalografický výbrus použitých DSC vzoriek. Pre bližšie špecifikovanie problému zvárania daných materiálov by bolo potrebné rozšíriť počet použitých metód a zamerať sa konkrétnejšie na štruktúry vzniknuté v zvarovom spoji.

Zoznam použitej literatúry

- [1] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [2] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [3] KUNCIPÁL, Josef. *Svařování pro konstruktéry a technology*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980, 356 s. Typové číslo L13-B2-IV-41/22 574.
- [4] ZOBAČ, Martin. *Elektronový svazek v technologiích* [online]. 2010, [cit. 26-05-2017] Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/cs/elektronovy-svazek-v-technologiich>
- [5] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996, 261 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [6] HOSFORD, William. *Iron and steel*. 1. vyd. USA: Cambridge University Press, 2012, 298 s. ISBN 978-1-107-01798-6.
- [7] FOLKHARD, Erich, et al. *Weilding metallurgy of stainless steels*. 1. vyd. Wien New York: Springer-Verlag, 1988, 279 s. ISBN-13 978-3-7091-8967-2.
- [8] TOTTEN, George. *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. 2. vyd. USA: CRC Press, 2007, 820 s. ISBN 978-0-8493-8455-4.
- [9] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [10] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [11] DOLEŽAL, Pavel, Simona HUTAŘOVÁ a Petra PAVLÍKOVÁ. *Příprava a hodnocení metalografických vzorků* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. [cit. 26-05-2017] Dostupné z: <http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/index.php>
- [12] PAVLOUŠKOVÁ, Zina. *Světelná mikroskopie* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. [cit. 26-05-2017]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/sm/Index.html>
- [13] VERHOEVEN, John. *Steel metallurgy for the non-metallurgist*. USA: ASM International, 2007, 228 s. ISBN 978-0-87170-858-8

- [14] HRIVŇÁK, Ivan. *Elektrónová mikroskopia ocelí*. 1. vyd. Bratislava: Veda-Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1986, 284 s.
- [15] KRIVOŠÍK, Miloslav. *Zváranie taviacou sa elektródou v ochrane plynu* [online]. 2006 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z: <http://matnet.sav.sk/index.php?ID=383>
- [16] KRIVOŠÍK, Miloslav. *Zváranie netaviacou sa elektródou v ochrane inertného plynu* [online]. 2006 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z: <http://matnet.sav.sk/index.php?ID=385>
- [17] KOPELIOVICH, Dmitri. *Electron beam welding* [online]. 2012 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z:
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electron_beam_welding_ebw
- [18] KOLAŘÍK, Ladislav. *Elektronové svařování-perspektivní metoda pro speciální materiály* [online]. 2016 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy.html>
- [19] MRŇA, Libor. *Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi: svařování, dělení a další technologie* [online]. 2016 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z: <http://docplayer.cz/7209420-Vyuziti-vykonovych-laseru-ve-strojirenske-praxi-svarovani-deleni-a-dalsi-technologie.html>
- [20] WEEKS, Gareth. *Laser beam machining* [online]. 2011 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/laser-beam-machining-lbm/>
- [21] STRUERS. *Laborom-5/15* [online]. 2017 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z: <http://www.struers.com/en-GB/Products/Cutting/Cutting-equipment/Labotom#>
- [22] IŽDINSKÁ, Zita. *Skúšky tvrdosti* [online]. 2006 [cit. 26-05-2017].
Dostupné z: <http://matnet.sav.sk/index.php?ID=531>
- [23] British Stainless Steel Association. *The Schaeffler and Delong diagrams for predicting ferrite levels in austenitic stainless steel welds* [online]. [cit. 26-05-2017]
Dostupné z: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>
- [24] HAVLÍČEK, Petr. *Vliv zpevňování výbuchem na strukturu a vlastnosti Hadfieldovy oceli z hlediska užití v železničné dopravě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 135 s. Vedúci dizertačnej práce prof. Ing. Karel Stránský, DrSc..

Zoznam použitých skratiek

A- ampér
BCC- body centered cubic (priestorovo centrovaná kocka)
CO₂- oxid uhličitý
DSC- differential scanning calorimetry (diferenciálne kalorimetrické skenovanie)
EDS- energetická disperzná spektroskopia
FCC- face centered cubic (plošne centrovaná kocka)
hm.%- hmotnostné percentá
HV- tvrdosť podľa Vickersa
Hz- herz
kJ- kilojoul
m- meter
rtg.- röntgenové
TOO- tepelne ovplyvnená oblasť
V-volt
μm- mikrometer
°C- stupeň Celzia